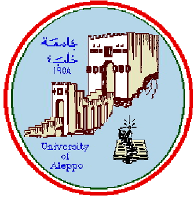


الجمهوريّة العربيّة السوريّة
وزارة التعليم العالي
جامعة حلب – كليّة الهندسة الميكانيكيّة
قسم الميكانيك التطبيقي

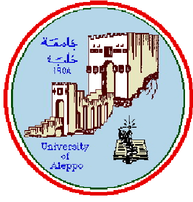
مقارنة بين مميزات العمل لأنظمة التبريد الكهروحراريّة أحاديّة وثنائيّة الطبقات

رسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الميكانيكيّة
قسم الميكانيك التطبيقي- هندسة التبريد الكهروحراري

إعـــــداد:
المهندس ياسر عبد الرزاق الغنيمة

العام الدراسي 2009 \ 2010

الجمهوريّة العربيّة السوريّة
وزارة التعليم العالي
جامعة حلب – كليّة الهندسة الميكانيكيّة
قسم الميكانيك التطبيقي



مقارنة بين مميزات العمل لأنظمة التبريد الكهروحراريّة أحاديّة وثنائيّة الطبقات

رسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الميكانيكيّة
قسم الميكانيك التطبيقي- هندسة التبريد الكهروحراري

بإشــــراف:
الدكتور عبد الله العموري
المدرّس في قسم هندسة الطاقة
من كليّة الهندسة الميكانيكيّة - جامعة حلب

إعـــــداد:
المهندس ياسر عبد الرزاق الغنيمة

العام الدراسي 2009 \ 2010

شهادة

أشهد بأنّ العمل الموصوف في هذه الرسالة" **مقارنة بين مميزات العمل لأنظمة التبريد الكهروحراريّة أحاديّة وثنائيّة الطبقات**" هو نتيجة بحث علمي قام به المرشّح المهندس ياسر عبد الرزاق الغنيمة بإشراف الدكتور المهندس عبد الله العموري المدرّس في قسم هندسة الطاقة- كلية الهندسة الميكانيكيّة- جامعة حلب، وإنّ أيّ رجوع إلى أيّ بحث آخر في هذا الموضوع موثّق في النص.

المرشح المهندس
ياسر عبد الرزاق الغنيمة

المشرف
الدكتور عبد الله العموري

تصريح

أصرّح بأنّ هذا البحث" **مقارنة بين مميزات العمل لأنظمة التبريد الكهروحراريّة أحاديّة وثنائيّة الطبقات**" لم يسبق له أن قبل للحصول على شهادة، ولا هو مقدم حالياً للحصول على أيّ شهادة أخرى.

المرشح المهندس
ياسر عبد الرزاق الغنيمة

نوقشت هذه الرسالة بتاريخ 2009/12/10م

وأجيزت

عضو	عضو	رئيس لجنة الحكم
الدكتور	الدكتور	الدكتور
عبد الله العموري	**وجيه ناعمة**	**عدنان الأحمد**
مدرّس بقسم هندسة الطاقة	أستاذ مساعد بقسم القوى الميكانيكية	أستاذ مساعد بأكاديمية الأسد
كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة حلب	كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة دمشق	للهندسة العسكرية- محافظة حلب
(المشرف على الرسالة)		

شكر وتقدير

الشكر الأوّل لله عزّ وجل..

الشكر الثّاني للدكتور عبد الله الذي لم يتوانى عن تقديم كل عون لي.

الشكر الجزيل لكل من قدم ليّ المساعدة في إنجاز هذا العمل.

الإهداء

الإهداء الأوّل.....إلى ابني البكر محمّد.

الإهداء الثّاني.....إلى والديّ الكريمين.

الإهداء الثّالث.....إلى أخوتي وأخواتي.

الملخص

تم في هذا البحث دراسة تقنية التبريد الكهروحراري وهو نوع من أنواع التبريد الحديثة التي لاقت في الآونة الأخيرة الكثير من الاهتمام والبحث العلميين نظراً لما يمتلكه من مميزات هامة تواكب متطلبات التطور العلمي الحاصل. حيث تمّ **أولاً:** دراسة التصاميم الرئيسية لأنظمة التبريد الكهروحراريّة المستخدمة سواءً الأحاديّة أو الثنائيّة الطبقات وتبيان مميزات كل تصميم، ثم تم إجراء دراسة مقارنة بين نظامي التبريد الكهروحراري الأحادي والثنائي الطبقات على قاعدة عدم التوازن الترموديناميكي التي استخدمت لاستنتاج العلاقات العامة لثلاث مميزات مهمّة لتحديد أداء نظام تبريد كهروحراري، وهي علاقة معامل الأداء وعلاقة معدّل التبريد وعلاقة طاقة الدخل المستهلكة وبوساطة هذه العلاقات تم مناقشة نظامي التبريد بشكل مفصل، حيث تم حساب معامل الأداء الأعظمي ومعدّل التبريد الأعظمي وكذلك تم تعريف معامل البناء الداخلي (Internal Structure) لأجهزة التبريد الكهروحراريّة. إنّ النتائج التي تم الحصول عليها من خلال الدراسة بين مميزات نظام التبريد الكهروحراري الأحادي والثنائي أثبتت أنّه عندما تكون قيمة صغيرة لـ θ (نسبة درجة حرارة الجهة الساخنة للنظام على درجة حرارة الجهة الباردة) يكون COP_{max} لنظام التبريد الكهروحراري الثنائي الطبقات أكبر من قيمته للنظام الأحادي الطبقة بينما معدّل التبريد الأعظمي للنظام الأحادي أكبر من قيمته في النظام الثنائي وهنا الأفضل هو نظام التبريد الأحادي. في حال قيمة كبيرة لـ θ يكون كلّ من COP_{max} ومعدّل التبريد الأعظمي للنظام الثنائي أكبر من قيمتهما لنظام التبريد الكهروحراري الأحادي، هنا يتوجب استخدام نظام التبريد الثنائي.

ثانياً: في القسم البرمجي تم دراسة محاكاة أداء حاسوبيّة رياضيّة (Performance Simulation) لنظام ضخ حراري كهروحراري جديد في سبيل تحسين فعاليّة أداء الأنظمة الكهروحراريّة يسمى بالنظام الهجين (Hybrid System) الذي يجمع بين تقنية الكهروحراريّة والدّارة الانضغاطيّة، وهذا النظام الجديد (أيّ المبرّد الكهروحراري – ضغط البخار الهجين) أعطى نتائج جيدة من حيث العمل حيث تم الحصول على انتقال حراري بمقدار 940 W عند محاكاة نظام التبريد، كما أنّ التحليل النظري للنظام يتنبأ بتحسن قيم سعة التبريد ومعامل الأداء للنظام الجديد.

الـفـهـرس

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمـــة

كانت البداية سنة 1990 عندما تولدت مجموعة من المخاوف البيئيـــة بخـــصوص وسائط التبريد المستخدمة الضّارة كالأمونياك، إضافة للاهتمام المتزايد بتبريـــد الأجهـــزة الإلكترونية الحديثة، قاد هذا إلى إعادة الاهتمام والبحث في مجال تقنيّات التبريد الجديـــدة، والتبريد الكهروحراري قد يكون الأكثر حداثة في هذه التقنيّات بينما طرق التبريد الأخرى كتقنيّة الانبعاث الأيوني (Thermionic Emission) وغيرها لم تلقَ رواجاً في الاستخدام.

كان التبريد الكهروحراري أحد التقنيّات البديلة التي تساعد علـــى خفـــض نـــسبة غازات (Chlorofluorocarbons - CFC's) في البيئة، كونه لا يحوي أي وســيط تبريـــد ضار، فهو يقوم على مبدأ تحويل الطاقة الكهربائيّة النظيفة- المغذّاة من منبع طاقي أومـــن خلايا شمسيّة لتوليد الطاقة الكهربائيّة- إلى طاقة حراريّة تتجلى بحدوث فارق حراري بين الوصلات، وفي الوقت الحاضر بات نظام التبريد الكهروحراري مـــستخدماً فـــي أغلـــب المجـــالات الـــصناعيّة والطبيّـــة والفـــضائيّة والزراعيّـــة التـــي تتطلـــب تحكّمـــاً دقيقاً بدرجات الحرارة، فاستخدم في تبريد العناصر المولّدة لإشعاع الليزر وبعض قطـــع الحاسوب الحساسة للحرارة التي تتطلب بيئة عمل ذات درجة حرارة معينة للمحافظة على أحسن أداء لها، واستُخدم في الديودات الليزريّة – الكواشف الضوئيّة – أجهـــزة تخـــزين متقارنة (مزدوجة) الشحنة (Charge - Coupled Devices) والتي يرمز لها بــــ CCDs، وهذا الازدياد في استخداماته نتيجة ميّزاته المتعددة.

آلة التبريد الكهروحراريّة التي تعتمد على مبدأ بيلتيه، تتميز بعـــدة ميّـــزات عـــن غيرها، كالوثوقية في العمل وانعدام الضجيج لعدم وجود أجزاء متحرّكـــة فـــي الـــدارة، وتتميز بعمر تشغيلي طويل يتراوح بين (200 ÷ 100) ألف ساعة عمل، وبصغر الحجـــم والقدرة على التحكّم الدقيق بدرجة حرارة المكان المطلوب تبريـــده، وتعـــرّف المبـــرّدات الكهروحراريّة بأنّها أجهزة في الحالة الصلبة تقوم بتحويل الطاقة الكهربائيّة مباشرةً إلـــى فارق حراري باستخدام مبدأ بيلتيه، ويرجع مفهوم تبريد الحالة الصلبة إلى بـــدايات حقـــل العمل في الكهروحراريّة نفسها تقريباً، أي منذ اكتشاف تأثير بيلتيه (Peltier Effect) ســـنة 1834، كما أنّ القدرة على بناء آلة التبريد بالحالة الصلبة موجودة، والتي تتم على أســـاس مبدأ بيلتيه في التبريد ولذلك تسمى أحياناً بمبرّدات بيلتيه (Peltier Coolers) أوالمبـــرّدات الكهروحراريّة (Thermoelectric Coolers).

ناقشنا في هذا البحث أداء تقنيّة الكهروحراريّة من خـــلال دراســـة نظـــام تبريـــد كهروحراري مكوّن من طبقة واحدة ومقارنتها مع دراسة نظام تبريد كهروحراري ثنـــائي الطبقات، واستنتاج علاقاتهما المميّزة واستخلاص النتائج وتمثيلها بيانياً، وتحديـــد شـــروط العمل المثالي لهما، ثم دراسة محاكـــاة أداء (Performance Simulation) لنظـــام ضـــخ حراري - كهروحراري جديد في سبيل تحسين فعاليّة عمل النظام، والذي يسمى بالنظـــام الهجين (Hybrid System) الذي يجمع بين خواص تقنية التبريد الكهروحراري والـــدارة الانضغاطيّة (Hybrid Compressor-Thermoelectrics Refrigeration Systems).

الفصل الأوّل

أساسيات التبريد الكهروحراري

Basics of The Thermoelectric Cooling

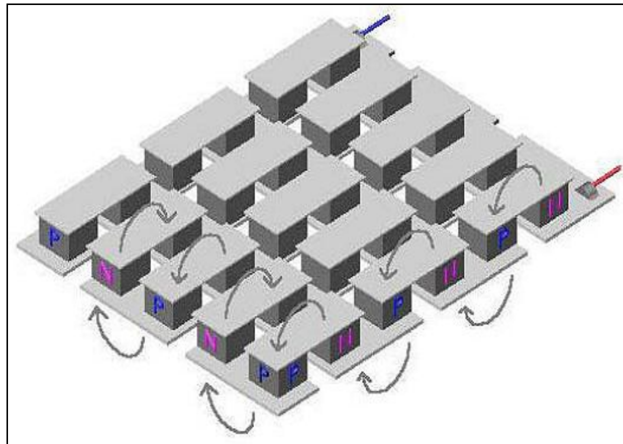
1-1- مفهوم التبريد الكهروحراري Concept of Thermoelectric Cooling:

اكتشف العالم الفرنسي (Jean Charles Peltier) جان كارلوس بيلتيه (1785 – 1845) في عام 1834 التأثير التبريدي للكهروحراريّة، والذي بات يعرف بـ{ تأثير بيلتيه (Peltier Effect) }، كان ذلك عندما مرّر تياراً كهربائيّاً عبر وصلة مكوّنة من مادتين مختلفتين موصلتين للتيار الكهربائي (Conductors)، سبّب ذلك فرقاً في درجات الحرارة (فارق حراري) بين طرفي الوصلة، ومن ناحية ثانية أخفق بيلتيه في فهم هذه الظاهرة الفيزيائية وكان تفسيره أنّ التيار الضعيف الحاصل لا يخضع لقانون أوم، وفي عام 1838 قدّم العالم أميل لينز (Emil Lenz) العضو في معهد بطرسبرغ الأكاديمي تفسيراً واضحاً لهذه الظاهرة من خلال تجربته على وصلة مشكلة من مادتي بزموت- أنتموان (Bismuth –Antimony) يمر فيها تيار كهربائي.

خلال الفترة (1909-1911) استنتج العالم (Alten Krich) الأساس النظري للتبريد الكهروحراري، وأوضح من خلال عمله أنّ التبريد الكهروحراري يحتاج لمواد ذات قيمة مرتفعة لمعامل سيبك، وإيصاليّه كهربائيّة جيدة لتقليل حرارة جول وإيصاليّه حراريّة منخفضة لتقليل انتقال الحرارة من الوصلات إلى الوصلات الأخرى لنظام التبريد لنحصل على فارق حراري عالٍ، وبعد التطور والتوسع بمعرفة المواد شبه الموصلة (أنصاف النواقل) الحاصل منذ عام 1950 أصبحت مادة تيليرايد البزموت ذات الصيغة (Bismuth Telluride - Bi_2Te_3) المادة الرئيسية الأوليّة المستخدمة في أنظمة التبريد الكهروحراري.

إنّ مبدأ العمل في هذا النظام بشكل مبسط كالتالي: عند تغذية النظام (الدّارة) بتيار كهربائي مستمر ذو جهد منخفض، تتحرك الإلكترونات الحرّة في الدّارة المغلقة وضمن أنصاف النواقل بنوعيها {الشكل (1-1)} - من القطب السالب N إلى القطب الموجب P - في الدارة فيؤدي ذلك لنشوء فرق في الكمون ينتج عنه نشوء قوة محرّكة كهربائية مختلفة خلال أنصاف النواقل تجبر الإلكترونات الحرّة على التحرك من المادة السالبة التي تتوفر فيها بكثرة باتجاه المادة الموجبة التي تعاني من نقص في الإلكترونات

حاملةً معها الحرارة، انتقال الإلكترونات الحرّة سيؤدي لانخفاض درجة حــرارة الوصـــلة السالبة، بالتالي يتوجب امتصاص حرارة من الوسط المحيط بها كون الحرارة تنتقــل مــن الوسط ذو درجة الحرارة المرتفعة إلى الوسط ذو درجة الحرارة المنخفضة، وتُمتص هذه الحرارة من المكان المراد تبريده، بإختصار يمكن القول أنّ فرق الكمون يُنتج قوة محرّكة كهربائيّة ينتج عنها امتصاص حرارة من خلال الوصلة الباردة (الـــسالبة) مـــن الوســـط المحيط بها (المراد تبريده)، وطرد حرارة خلال الوصلة الساخنة للوسط الخـــارجي ويـــتم ذلك نتيجة اختلاف القوة المحرّكة الكهربائيّة للمواد شبه الموصلة عند الوصـــلات، أي أنّ نظام التبريد الكهروحراري يُبنى بشكل رئيسي على خاصية المواد شبه الموصلة السابقة.



الشكل (1 -1) يبين جهة سريان الإلكترونات الحرّة في دارة نظام تبريد كهروحراري.

أنّ تحوّل الطاقة الكهربائيّة إلى طاقة حراريّة، يتجلى لنا بحدوث اخـــتلاف فـــي درجات الحرارة بين طرفي الوصلة المشكّلة للنظام الكهروحراري (تأثير بيلتيه) - أســـاس صناعة أجهزة التبريد الكهروحراريّة- وعمل الإلكترونات الحرّة في النظام الكهروحراري يناظر عمل وسائط التبريد (Refrigerants) في دارات التبريد المعروفة، والجـــدول (1-1) يوضّح أوجه المقارنة بين نظامي التبريد الكهروحراري والانضغاطي [19].

الجدول (1 -1) يبين مقارنة بين نظامي التبريد الكهروحراري والانضغاطي.

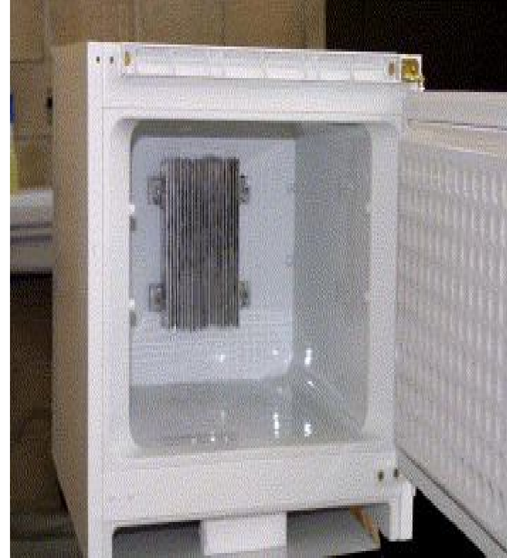
نظام التبريد الكهروحراري	نظام التبريد الانضغاطي
إلكترون حر	وسيط تبريد
منبع تيار مستمر (بطارية)	ضاغط مع محرك كهربائي
أسلاك التوصيل	أنابيب التوصيل
الجهة الباردة (قطب سالب)	المبخّر
الجهة الساخنة (قطب موجب)	المكثّف
فرق القوة المحرّكة الكهربائيّة	صمام التمدد

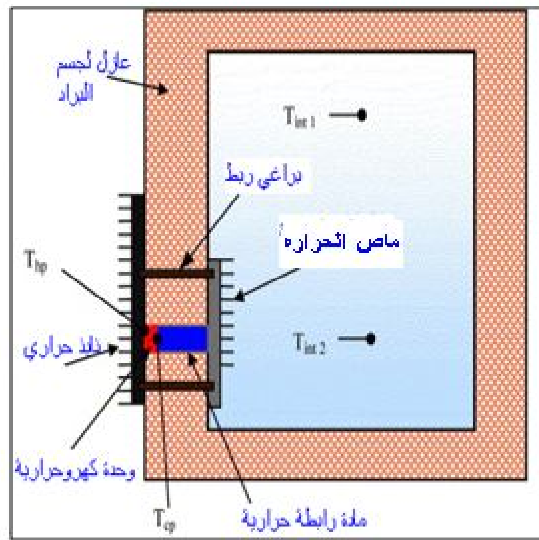
1- 2- المبرّد الكهروحراري The Thermoelectric Cooler:

المبرّدات الكهروحراريّة أو مبرّدات بيلتيه (Peltier Coolers)، ويرمز لها بـــ TEC هي أجهزة بالحالة الصلبة يكون فيها الـــضخ الحـــراري { التـــدفق الحـــراري بواســـطة الإلكترونات الحرّة المتحرّكة (حوامل الحرارة) بتأثير الحقل الكهربائي، ومشابهة لحركة وسيط التبريد في دارة التبريد الانضغاطيّة} باستخدام تـــأثير بيلتيـــه، أي بتمريـــر تيـــار كهربائي مستمر ثابت في دارة النظام الكهروحراري نحصل على فـــارق حـــراري بـــين طرفيها، وتنتقل الحرارة من المكان المراد تبريده إلى ماص الحرارة الموجود على الجهـــة الباردة للجهاز ثم إلى الجهة الساخنة للجهاز فالنابـــذ الحـــراري ليـــتم طرحهـــا للوســـط الخارجي، لدينا الشكل (1- 2) يُظهر مبرّداً كهروحراريّاً مخبريّاً والمبرّد الكهروحـــراري المستخدم في هذا العمل صمّم بحجم داخلي m^{-3} (55×10^{-3})، وهو مكـــوّن مـــن وحـــدة (صفيحة) بيلتيه استطاعتها 50 W وأبعادها (40 mm x 40 mm x 4 mm) ولها مبـــادلين حراريين للنبذ الحراري، الأوّل على الجهة الساخنة والآخر على الجهة الباردة مع مروحة استطاعتها 2 W ومادة رابطة من الألمنيوم تُوصل الطرف البارد بالطرف الساخن [2].

إنّ الأجهزة التجاريّة الحديثة لـــ TEC تحتوي على العديد من أزواج المواد شبه الموصلة (أنصاف النواقل) من النوع (P -type) والنوع (N-type)، المتـــصلة كهربائيّـــاً على التسلسل – أي يوصل الجزء الساخن للعنصر الكهروحراري بالجزء البارد للعنصر الذي يليه– بواسطة صفائح رقيقة من النحاس وحرارياً على التوازي، يُـــستخدم الوصـــل على التسلسل عندما يطلب الحصول على فارق حراري كبيـــر، بينمـــا يُـــستخدم وصـــل العناصر الكهروحراريّة على التفرع عندما يطلب الحصول على سعات تبريديّـــة كبيـــرة. هذه العناصر توضع بين قاعدتين " لوحين " معزولتين (Insulated) كهربائياً وموصـــلتين للحرارة، واتجاه التدفق الحراري يمكن أن يتغير بتبديل قطبي مـــزوّد التيـــار الكهربـــائي المطبق DC كما يُظهر ذلك الشكل (2- 3)، والمبرّدات الكهروحراريّة يمكـــن أن تـــصنع بأشكال وقياسات مختلفة، لكن الشكل العام للقاعدة يكون مربعاً أو مستطيلاً وكقياس خاص لنظام مؤلف من طبقة واحدة من العناصـــر نـــصف الناقلـــة، تتـــراوح أبعـــاد الوحـــدة الكهروحرارية من mm^2 (3 x 3) وبسماكة 4 mm حتى mm^2 (60 x 60) وبسماكة 5 mm، بينما الضخ الحراري الأعظمي يتـــراوح بـــين W (125 ÷ 0) ويتـــراوح عـــدد الأزواج

الكهروحراريّة عادةً بين (127 ÷ 3) زوج كهروحراري في كل وحـــدة كهروحراريّـــة، وتحدد هذه الأبعاد القياسية من قبل الشركات الصانعة.



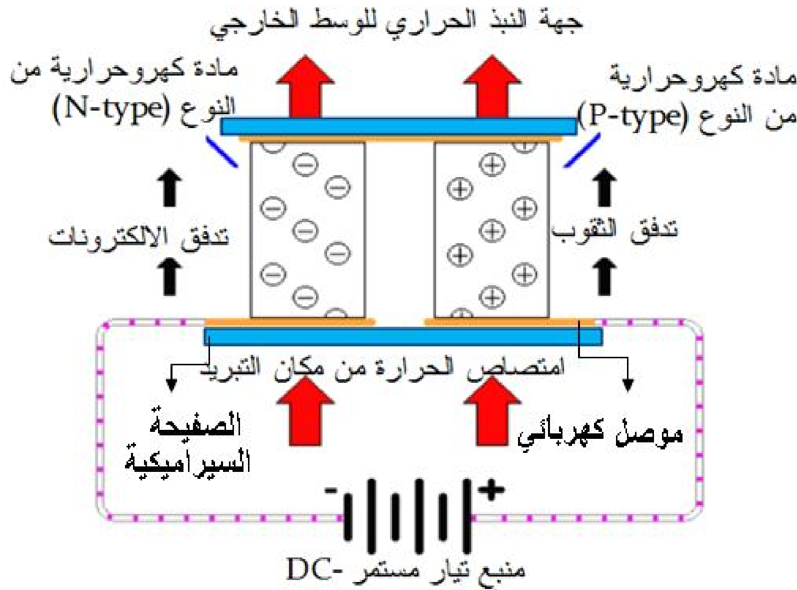


الشكل (1- 2) يمثل المبرّد الكهروحراري المخبري ومخططه التفصيلي.

ولأن الوصلة الباردة لنظام التبريد الكهروحراري تتعرض للتقلّص بينما الوصـــلة الساخنة تتعرض للتمدد أثناء العمل، وهذا يُنتج الإجهادات الحراريّة لذلك تكون الوحـــدات الكهروحراريّة مزوّدة بـــقاعدة للتبادل الحراري (Footprint) مساحتها أكبرمن mm^2 50 قياس الوحدة الكهروحراريّة، والقياس المحدد mm^2 (60 x 60) يسبب إجهـــادات حراريّـــة عند نقاط الاتصال الكهربائي الداخلية للوحدة مسببة أعطال التماس- قصر- (Short).

لكن معظم الوحدات الكهروحراريّة من ناحية الطـــول أقـــل مـــن 50 mm وذلـــك لاعتبارات ميكانيكيّة، حيث الوحدة الكهروحراريّة تميل للانحناء مثل أي عنصر حـــراري عندما تكون نهايته الباردة متغيرة درجة الحرارة بينما نهايته الساخنة تبقى ثابتة، وإذا كان الإجهاد الحراري كبيراً بشكل كاف يمكن أنّ تتشقق الصفائح أوالعناصر الحراريّـــة، لهـــذا السبب توضع الوحدات الكهروحراريّة بين مبادلين حراريين أكبر حجماً من الوحدة نفسها، يتراوح عادةً ارتفاع (سماكة) الوحدة بين mm (5 ÷ 1) للنظام المكوّن من طبقة واحـــدة، وقد يصل الارتفاع إلى mm 20 في الأنظمة متعددة الطبقات (من أنصاف النواقل) التـــي تستخدم للحصول على فارق حراري كبير بين الجهتين الباردة والـــساخنة، وهـــي عـــادة وكقيمة عظمى 6 طبقات في كل جهاز كهروحراري.

ويتكون نظام التبريد الكهروحراري البسيط [15] (ممثلاً بــزوج كهروحــراري واحد) من الأقسام الرئيسية المبينة في الشكل (1- 3):



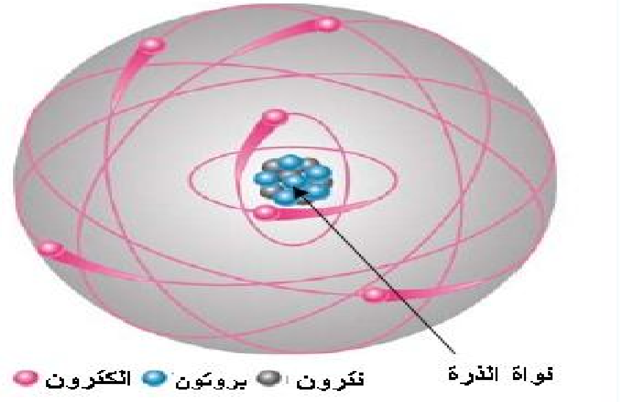
الشكل (1 – 3) يمثل المكوّنات الرئيسيّة وسير عمل نظام تبريد كهروحراري.

1- القاعدة Substrate: يقصد بها الطبقة السيراميكيّة التي تحوي عناصــر النظــام، وتكون مصنوعة من أوكسيد الألمنيوم (AL_2O_3)، أومن نتريد الألمنيوم (ALN).

2- الموصل Conductor: مصنوع من معدن النحاس أو من معــادن أخــرى جيــدة الناقليّة الكهربائيّة.

3- المواد شبه الموصلة الكهروحراريّة Thermoelectric Semiconductors:

سنقدم في البداية فكرة مختصرة عن بنية المواد بشكل عام، وبنية الذرّات المكوّنة للمواد الهندسيّة والشحنات الكهربائيّة التي تكتسبها هذه المواد. قدم العالم (Boher) تصميمه لتمثيل الذرّة وما يحيط بها من الإلكترونات ومكوّنات النواة من البروتونــات والنترونــات الشكل (1- 4).



الشكل (1 - 4) يمثل نموذج بوهر (Boher Model) لتمثيل الذرّة.

هناك نوعان من الشحنات الكهربائيّة المكتسبة للمواد:

✓ شحنة موجبة: تكتسبها المواد من البروتونات أي:

(شحنة موجبة ⟵ بروتون)

✓ شحنة سالبة: تكتسبها المواد من الإلكترونات أي:

(شحنة سالبة ⟵ إلكترون)

وعلى هذا الأساس يمكن أن نميّز المواد بحسب الشحنات الكهربائيّة التي يمكن أن تكتسبها وهي:

- **عدد الإلكترونات = عدد البروتونات ⟵ مادة متعادلة كهربائياً.**
- **عدد الإلكترونات < عدد البروتونات ⟵ مادة ذات شحنة موجبة.**
- **عدد الإلكترونات > عدد البروتونات ⟵ مادة ذات شحنة سالبة.**

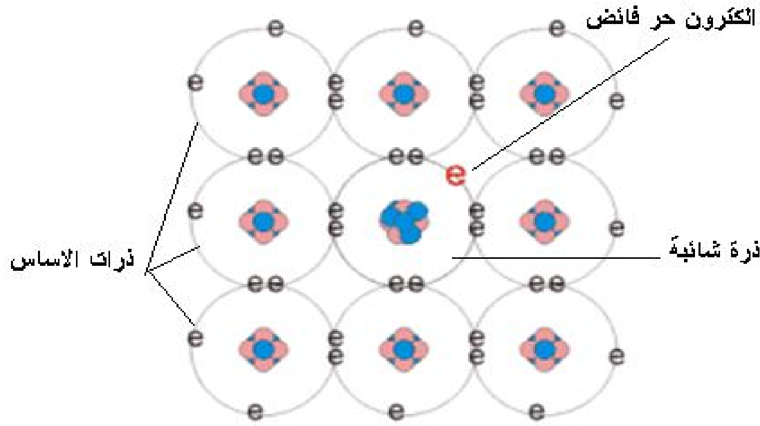
عمليّاً تنقص المقاومة الكهربائيّة لنصف ناقل نقصاً كبيراً عندما تشوبه شائبة مـا، فتزداد ناقليّة عنصر الجرمانيوم مثلاً ملايين المرّات، إذا شابه عنصر الأنديوم بنسبة % 1.

بشكل رئيسي تقسم المواد شبه الموصلة (أنصاف النواقل) إلى نـوعين بحـسب الـشائبة (العنصر المضاف):

1)- النـوع (N -type) : مثـل مركـب (Bismuth-Telluride-Selenium) سـيلينيوم- تيليرايد البزموت (Bi Te-Se).

تتشكل المادة من النوع (N- type) عند إضـافة ذرّات مـواد خماسـية التكـافؤ (عدد إلكترونات التكـافؤ= 5 إلكترونـات) مثـل ذرّات الأنتمـوان { Antimony (Sb) } وذرّات الزرنيخ { Arsenic (As) } وذرّات الفوسـفور { phosphorous (p) } إلـى ذرّات مادة رباعيّـة التكـافؤ مثـل الـسيلكون {Silicon (Si)} أو البزمـوت {Bismuth (Bi)}

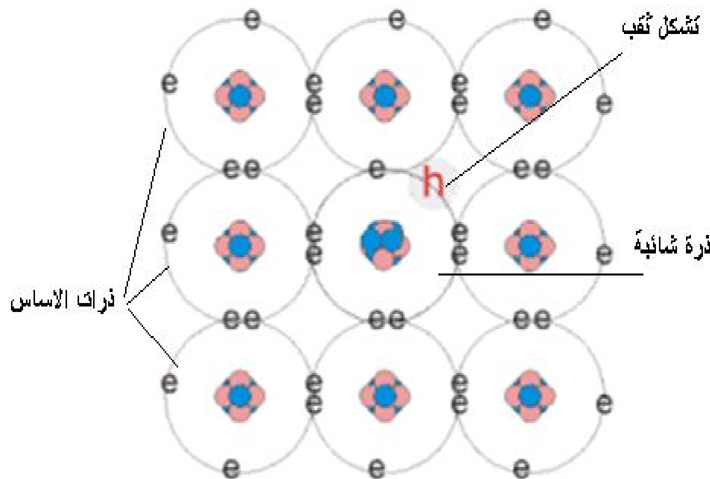
أو الجرمانيوم {(Ge) Germanium}، يؤدي ذلك لإزدياد الإلكترونات الحرة ضمن بنية المادة الأساس (السيلكون مثلاً) لتصبح البنية المجهريّة لهذا النوع كما يُظهرها الشكل (1- 5).



الشكل (1- 5) يبين البنية الذريّة لنصف ناقل من النوع (N-type).

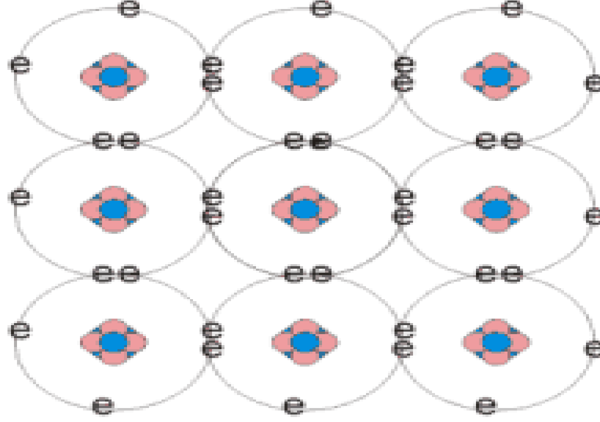
2) - النوع (P-type) : مثل مركب (Bismuth-Telluride-Antimony) أنتموان– تيليرايد البزموت (Bi Te-Sb).

تتشكل المادة من النوع (P-type) عند إضافة ذرّات مادة ثلاثيّة التكافؤ (عدد إلكترونات التكافؤ = 3 إلكترونات) مثل ذرّات البورن { Boron (B) } وذرّات الغاليوم {Gallium (Ga) } وذرّات الأنديوم {Indium (In) } أو الأنتموان {Antimony (Sb) } إلى ذرّات مادة رباعيّة التكافؤ مثل السيلكون {Silicon (Si) } أو البزموت { Bismuth (Bi) }، يؤدي ذلك إلى ازدياد عدد الثقوب ضمن بنية المادة الأساس (السيلكون مثلاً) لتصبح البنية الذريّة لهذا النوع كما يُظهرها الشكل (1- 6).



الشكل (1- 6) يبين البنية الذريّة لنصف ناقل من النوع (P-type).

بينما الحالة النموذجية للبنية الذريّة للمواد المتعادلة الشحنة تكون كما يُظهرها الشكل (1- 7).



الشكل (1- 7) يبين البنية الذريّة لمادة متعادلة الشحنة.

4- أدوات تجميع ولحام لمكوّنات النظام.

وبشكل عام يمكن أنّ تظهر أفضليّة استخدام التبريد الكهروحراري في التطبيقات، عندما يُطْلَبُ ضبطٌ دقيقٌ لدرجة حرارة التبريد للتطبيق المدروس، وعندما نحتاج لتبريد أدنى من درجة حرارة الوسط الخارجي، ويُطْلَبُ المحافظة على درجة حرارة تبريد مستقرة بدون تموّجات، حيث أنّ أجهزة التبريد الكهروحراري قادرةٌ على تحقيق ضبط حتى ($\pm$ 0.01 ^{0}C)، ولا توجد أيّ طريقة تبريد أخرى مجهّزة بمثل هذه البساطة والدقة والملائمة لمراقبة درجة الحرارة.

1- 3- تعريفات ومصطلحات Terms and Definition:

1- درجة حرارة الوسط المحيط Ambient Temperature: وهي درجة حرارة البيئة المحيطة بنظام التبريد الكهروحراري، وأحياناً يطلق عليها درجة حرارة الغرفة [20].

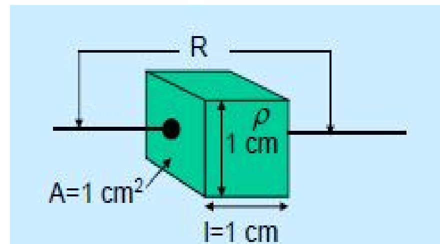
2- الحمل الحراري الفعّال Active Heat Load: وهو كمية الحرارة التي يتم توليدها من قبل الجسم المادي عند وجود فرق في درجات الحرارة، وبشكل آخر عبارة عن طاقة الدخل لأي جهاز مغذى بالطاقة (الشدة x التيار).

3- المقاومة الكهربائيّة للوحدة (المركبة) الكهروحراريّة المغذّاة بتيار متناوب AC-Resistance: وتقاس بمعدات اختبار مخصصة لها، حيث إنّ مقياس أوم النموذجي

الذي يستخدم إشارة تيار مستمر يعطي نتائج خاطئة بينما المقياس ذو التيار المتناوب نتائجه غير دقيقة.

4- المقاومة الكهربائيّة النوعيّة Specific Electrical Resistivity: وهي تتعلق بمقدار التيار الذي سينقله العنصر عبر حجمه والناجم عن فرق الجهد وتقاس بـ (Ω.m)، والمقاومة الكهربائيّة النوعيّة مميزة أساسية للمادة عندما تضرب بطول الجسم وتقسم على مساحة المقطع العرضي، الشكل (1-8).

$$R = \rho . \frac{L}{A} \quad (1\text{-}1)$$



الشكل (1 - 8) يبين طريقة حساب المقاومة الكهربائيّة النوعيّة لمادة ما.

ولدنيا الجدول (1- 2) يبين قيم المقاومة الكهربائيّة النوعيّة لأنواع للمواد الهندسية.

الجدول (1- 2) يعطي قيم المقاومة الكهربائيّة النوعيّة لأنواع المواد الهندسيّة.

مادة عازلة	مادة نصف ناقلة	مادة موصلة
$\rho = 10^{+12}$ .cΩm	$\rho = 50$ .cΩm (جرمانيوم) $\rho = 50 \times 10^{+3}$.Ωmc سيلكون	$\rho = 10^{-6}$.Ωmc (نحاس)

5- معامل الأداء Coefficient of Operation Performance (COP): وهو نسبة الحرارة المزالة في حالة التبريد (الحرارة المضافة في حالة التسخين) مقسومة على الاستطاعة الكهربائيّة المستهلكة، إنّ مصطلح معامل الأداء هو الأكثر استخداماً من مصطلح المردود في حالة النظام الكهروحراري لأنّه من الممكن إزالة حرارة أكبر من الاستطاعة المقدمة وفي هذه الحالة سيكون المردود أكبر من الواحد بينما مردود أيّ آلة أقل من الواحد.

6 – فرق درجات الحرارة الأعظمي (ΔT_{max}): التي يتم الحصول عليها بين الجهتين الباردة والساخنة للوحدة (المركبة) الكهروحراريّة وذلك عند تطبيق تيار أعظمي I_{max} وعند عدم وجود حمل حراري مطبّق على المجموعة، وهو يقاس عند درجة حرارة للوسط المحيط 300 K، وهو أيضاً يستخدم كمؤشر قياسي لسعة التبريد للنظام الكهروحراري، علماً أنّه يستحيل إزالة كل المصادر الحراريّة.

7- وحدة القياس البريطانية (BTU): مقدار الحرارة المطلوبة لرفع باوند واحد من الماء بمقدار درجة فهرنهاتيّة واحدة وذلك عند درجة حرارة قياسية $39.2\ ^0F$ وضغط جوي 1atm، وعلاقة التحويل للواحدات في الجملة الدولية هي كالتالي { الجدول (1- 3)}:

$1BTU=1055\ J$ ،$1TON_{ref}=12000\ BTU = 3024\ k.\ cal/h = 3.5\ kW$,$^0C=(^0F-32)5/9$

الجدول (1- 3) يبين التحويلات بين الجملة الدولية والجملة البريطانية لأهم المميزات.

المميزة	علاقـة التحويل
Thermal Conductivity الإيصاليّة الحرارية	$1\ BTU/\ hr\ ft\ ^0F = 1.73\ W/\ m.K$
	$1\ W/\ m.K = 0.578\ BTU/\ hr\ ft\ ^0F$
Power (heat flow rate) معدّل التدفق الحراري	$1\ W = 3.412\ BTU/\ hr$
	$1\ BTU/\ hr = 0.293\ W$
Area المساحة	$1\ ft^2 = 0.093\ m^2$
	$1\ m^2 = 10.76\ ft^2$
Length الطول	$1\ ft = 0.305\ m$
	$1\ m = 3.28\ ft$
الحرارة النوعيّة Specific Heat	$1\ BTU/\ lb\ ^0F = 4184\ J/kg.K$
	$1\ J/kg.K = 2.39\times10^{-4}\ BTU/\ lb\ ^0F$
Heat Transfer Coefficient معامل انتقال الحرارة	$1\ BTU/\ hr\ ft^2\ ^0F = 5.677\ W/m^2.K$
	$1\ W/m^2.K = 0.176\ BTU/\ hr\ ft^2\ ^0F$
Mass الكتلة	$1\ lb = 0.4536\ kg$
	$1\ kg = 2.205\ lb$

8- الضخ الحراري Heat Pumping : مقدار الحرارة التي يقوم النظام الكهروحراري بضخها أوإزالتها عند شروط العمل المعينة.

9- ماص الحرارة / نابذ الحرارة: إنّ تصميم النوابذ الحراريّة واختيارها هو عامل مهمّ وحاسم لعمل مثالي لنظام التبريد الكهروحراري، وبشكل عام يلصق نابذ الحرارة على الجهة الساخنة للوحدة الكهروحراريّة ليساعد على انتقال الحرارة ونبذها للوسط المحيط، بينما ماص الحرارة يكون على الجهة الباردة للوحدة الكهروحراريّة ليسهل انتقال الحرارة من الوسط المراد تبريده، وأغلب ماصات ونوابذ الحرارة مصنوعة من صفائح الألمنيوم، التي قد تحوي زعانف ملصقة بها لزيادة سطح التبادل، بالإضافة لمروحة تعمل على تحريك الهواء للوسط الخارجي عبر ماص الحرارة لالتقاط الحرارة من الوحدة، ويوجد نوع آخر من هذه الماصات بشكل صفيحة مع أنابيب مثبتة بداخلها يتم تمرير سائل عبرها لالتقاط الحرارة من الوحدة الكهروحراريّة، وسنشرح لاحقاً التصاميم الرئيسية للنوابذ الحراريّة في فقرة الأجهزة المساعدة.

10– الحرارة المنتقلة بتأثير فرق درجات الحـــرارة Passive Heat Load : هـــي كميـــة الحرارة المنتقلة عبر جدار معزول له مقاومة حراريّة من وسط درجة حرارته عالية إلى وسط درجة حرارته منخفضة.

11- تأثير بيلتيه Peltier Effect: عند مرور تيار كهربائي في وصلة تتألف مـــن نـــوعين مختلفين من المعادن يؤدي ذلك إلى حدوث أثر تبريدي يتجلى من خلال حدوث فارق فـــي درجات الحرارة بينهما.

12- تأثير سيبك Seebeck Effect: عند وضع وصلة تتألف مـــن نـــوعين مختلفـــين مـــن المعادن توضع نهايتيها عند درجتي حرارة مختلفة سيؤدي ذلك إلى مرور تيار كهربـــائي، وهو الأساس الذي تعتمد عليه المزدوجات الحراريّة لقياس درجة الحرارة.

13- الحرارة النوعيّة Specific Heat: مقدار الطاقة الحراريّة المطلوبة لرفع درجة حرارة مقدار معطى من المادة درجة مئوية واحدة، وتقاس بالجملة الدولية بـــ (J / kg.K).

14- معامل التمدد الحراري Thermal Coefficient of Expansion: وهو نسبة تغير الأبعاد للمادة بسب تغير درجات الحرارة ويقاس بـــ (cm / cm لكل درجة مئوية واحدة).

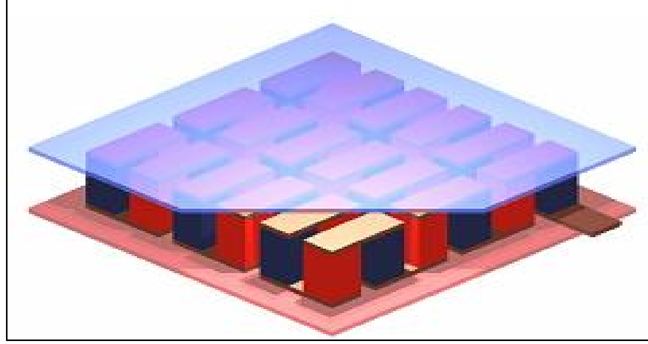
15- الإيصاليّة الحراريّة Thermal Conductivity : وتتعلق بمقدار الحرارة التـــي ينقلهـــا الجسم عبر حجمه عندما يتم فرض فرق في درجات الحرارة عبر ذلـــك الحجـــم، وهـــي مميزة أساسية وتقاس في الجملة الدولية بـــ (W / m. K).

16- السطح الحراري البيني Thermal Interface: وهو سطح بيني فيزيائي بـــين جـــسمين يتم توصيل الحرارة خلاله، أي يمكن القول أنّه مادة تتمتع بناقليّة حراريّة عاليـــة، وعـــادةً يستخدم معجون حراري بين المجموعة وماص الحرارة لتسهيل انتقـــال الحـــرارة، وفـــي بعض الأحيان توصل مع بعضها البعض.

17- المقاومة الحراريّة Thermal Resistance: وهي قياس الانخفاض في درجات الحرارة عند اجتياز السيّالة الحراريّة عبر العنصر الكهروحـــراري (ممانعـــة العنـــصر لانتقـــال الحرارة عبره)، ومن المقاومات الحرارية الشائعة (مقاومـــة الامتـــصاص الحـــراري– مقاومة السطح البيني الحراريّة) ويمكن القول إنّ المبرّدات الكهروحراريّة تعمـــل بـــشكل أفضل مع ماصات الحرارة الأفضل (أيّ مقاومات حراريّة منخفضة).

18- الوحدة (المركبـــة) الكهروحراريّـــة Thermal - Electric Module: عبـــارة عـــن مجموعة إلكترونيّة مبنية على أساس المواد نصف الناقلة، والتي تعمل كمضخة حراريّـــة صغيرة وذلك عند تطبيق تيار مستمر ذي جهد منخفض علـــى الوحـــدة الكهروحراريّـــة،

الحرارة لن تنتقل من طرف إلى آخر خلال الوحدة لذلك يبرد أحد الأطراف ويسخن الطرف الآخر، وفقاً لذلك فإنّ الوحدة الكهروحراريّة يمكن أن تستخدم للتبريد والتسخين، والشكل (1- 9) يبّين منظوراً للوحدة الكهروحراريّة.



الشكل (1- 9) يمثل منظوراً لوحدة تبريد كهروحراريّة.

19- معامل طومسون Thomson Coefficient: وهو مقياس تغير المحتوى الحراري خلال الناقل الكهربائي والذي يكون طرفاه (نهايتاه) عند درجتي حرارة مختلفة ويمر فيه تيار.

20- الجهد الأعظمي (V_{max}): هو الجهد الذي يتم الحصول عليه عند فرق درجات الحرارة الأعظمي ΔT_{max} وتطبيق تيار أعظمي I_{max} وعند درجة حرارة للوسط المحيط 300 K.

1- 4- تاريخ الكهروحراريّة History of The Thermoelectric:

تقنية الكهروحراريّة مرت بثلاث مراحل تطور رئيسيّة وهي [18]:

1- 4 -1- المرحلة من 1820 إلى 1850:

في عام 1821 اكتشف العالم الفيزيائي الأستوني توماس سيبك (Thomas Johann Seebeck) أنّ قوة محرّكة كهربائيّة (emf-Electromotive Force) تنتج في سلك معدني عندما يكون فارق حراري بين طرفيه، وعلى هذا الأساس– مبدأ سيبك– (Seebeck Effect) اعتمد إنتاج مولّدات الطاقة الكهروحراريّة، بعده بحوالي 13 سنة لاحظ العالم بيلتيه (Jean Peltier) أنّه عند عكس هذه الحادثة، أيّ بتمرير تيار كهربائي سينتج فارق حراري بين طرفي الوصلة (أي أنّ الجهة الأولى ستبرد والأخرى ستسخن)، وهذه الوصلة مكونة من مادتين مختلفتين، عرفت هذه الظاهرة فيما بعد بتأثير بيلتيه (Peltier Effect).

إنّ طبيعة تأثير بيلتيه بيّنت لأوّل مرة سنة 1838 من قبل العالم لينز (Lenz)، الذي استنتج أنّه بتغير جهة التيار الكهربائي المار فإنّه سيتم امتصاص حرارة أو نبذ حرارة في

وصلة مكونة من مادتين موصلتين متباينتين، وأثبت استنتاجه بتجربة تجمّد بعض نقط الماء على وصلة البزموت وذوبانها عند قلب جهة التيار، وفي سنة 1855 أوجد العالم (William Thomson) العلاقة النظريّة بين تأثير سيبك وتأثير بيلتيه، وهو أيضاً تنبأ بإيجاد التأثير الثالث في الكهروحراريّة والمعروف حالياً بتأثير طومسون (Thomson Effect)، والذي أثبتت ملاحظاته التجريبية هذا التأثير بعد سنوات، إذاً في هذه الفترة اكتشفت التأثيرات ومفاهيمها التجريبية وتطبيقاتها في التبريد أو توليد الطاقة.

1- 4- 2- المرحلة من 1930 إلى 1960:

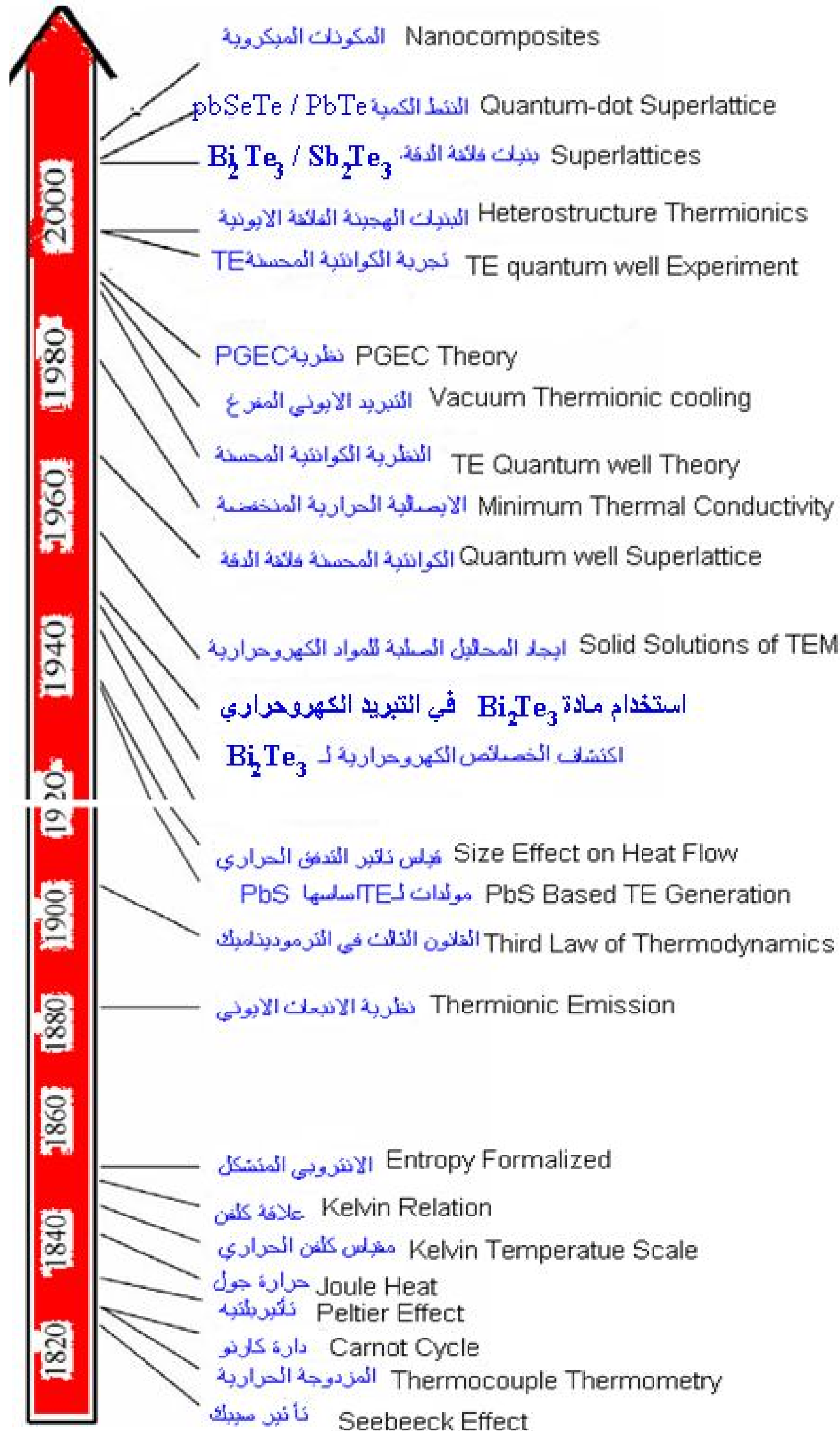
في هذه الفترة بدأ ظهور أبحاث جديدة في الكهروحراريّة مع التطور الحاصل في مجال المواد شبه الموصلة (Semiconductors) ذات القيمة المرتفعة لمعامل سيبك ($>100\ \mu V/K$) ، وفي عام 1949 أوجد العالم (Ioffe et al) نظرية العناصر الحراريّة نصف الناقلة (شبه الموصلة)، وفي عام 1954 لاحظ العالمان (Goldsmid and Douglas) بشكل تجريبي حدوث التبريد الكهروحراري من وسط خارجي درجة الحرارة أقل من الصفر، في الوقت نفسه لم يكن واضحاً ماهيّة أنصاف النواقل والمواد الكهروحراريّة بسبب علاقتها بالإيصاليّة الكهربائيّة المنخفضة وإيصاليتها الحراريّة العالية، وفي عام 1956 برهن العالم (Ioffe) وفريقه العامل أنّ نسبة الإيصاليّة الحراريّة على الكهربائيّة يمكن أنّ تنخفض إذا أضيف مع أنصاف النواقل عناصر شائبة (Isomorphous)، وخلال هذه الفترة تطور المفهوم الدقيق للتأثيرات الكهروحراريّة بشكل أكبر، فاليوم المواد الكهروحراريّة مثل خلائط تيليرايد البزموت (Bi_2Te_3) هي أيضاً تطورت.

1- 4- 3- المرحلة من 1990 إلى الوقت الحاضر:

التقدم الحاصل منذ عام 1960 في تحسين قيمة المقدار {($Z.T_h$) وهو جداء مميزة الشكل بدرجة حرارة الجهة الساخنة للنظام - راجع ص35 } كان بطيئاً حتى عام 1990 عندما تم الحصول على قيمة أعظميّة له حوالي الواحد، وما يزال البحث الكهروحراري يأخذ عدة مناح لتحسين القيمة ويتم التركيز على مواد مركبة جديدة، وهناك منحى اعتمد على التأثيرات الكميّة (Quantum Effects) في البنيات المجهريّة لزيادة قيمة المقدار ($Z.T_h$) مثل البنية الشبكية الفائقة الدقة (Superlattice) في ثنائية الأبعاد، عموماً إنّ المواد الكهروحراريّة الأكثر استخداماً في صناعة المبرّدات الكهروحراريّة هي خلائط (Bi_2Te_3) ولها قيمة للمقدار ($Z.T_h \approx 1$) عند درجة حرارة الغرفة 300 K، وقيمته لخلائط ($PbTe, Z.T_h \approx 0.9$ عند 700 K) ولخلائط (SiGe) $Z.T_h \approx 0.7$ عند درجة حرارة 1000 K.

منذ عام 1990 أوجد التطور السريع مواد البنية الدقيقة ذات القيمـــة الأكبـــر لـــــ ($Z.T_h$) فللمادة القاعديّة (Bi_2Te_3) هي حوالي $Z.T_h \approx 2.5$، وللمــادة القاعديّـة (PbTe Based Quantum-dot Superlattices) تساوي حوالي $Z.T_h \approx 2$.

الشكل (1- 10) يمثل أهم الأحداث الحاصلة في المجـال الكهروحـراري خـلال المراحل التاريخية الثلاث التي شرحناها سابقاً.



الشكل (1- 10) يمثل أهم التطورات الحاصلة في المجال الكهروحراري في المراحل الثلاث.

الفصل الثّاني

بنية نظام التبريد الكهروحراري

Thermoelectric Cooling System Construction

2-1- مقدمة Introduction:

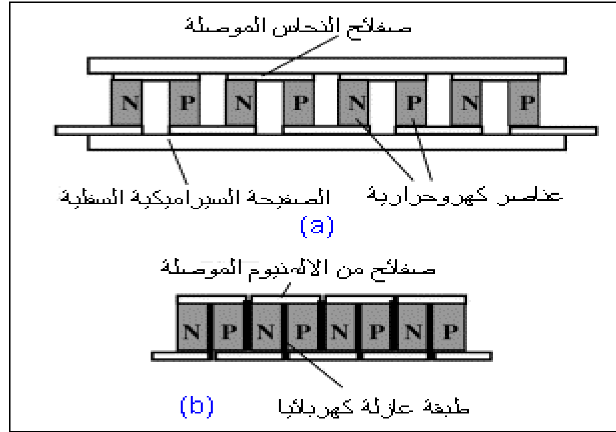
إحدى الصعوبات الكبرى التي واجهت العلماء في مجال الكهروحراريّة هي البحث عن مواد ذات قيمة مرتفعة للمقدار ($Z.T_h$)، ونعلم في الواقع أنّ هناك ثلاثة أنواع من المواد الصلبة من حيث الناقليّة الكهربائيّة، هي العوازل (مقاومتها الكهربائيّة النوعيّة كبيرة جداً بالدرجة العادية من الحرارة من مرتبة $\Omega . m$ 10^{+6} كالكوارتز)، وأنصاف النواقل (مقاومتها الكهربائيّة النوعيّة تتراوح بين $\Omega .m$ ($10^{5} \div 10^{-5}$) كالجرمانيوم والسيليسيوم)، والمعادن (مقاومتها الكهربائيّة النوعيّة صغيرة جداً من مرتبة $m\Omega$. 10^{-8})، حيث أنّ العوازل والمعادن هي مواد سيئة كهروحراريّاً لأنّ العوازل تملك ناقليّه كهربائيّة منخفضة جداً أو شبه معدومة، بينما تملك المعادن قيمة منخفضة لمعامل سيبك، بالإضافة أنّ كلاً من نواقل الكهرباء والحرارة في المعادن هي الإلكترونات الحرّة وتخضع لقانون (Wiedmann –Franz Law) حيث الإيصاليّة الحراريّة تتناسب مع الإيصاليّة الكهربائية، ومن الصعب زيادة قيمة المقدار ($Z.T_h$) في المعادن، إذاً تبقى فقط أنصاف النواقل (المواد شبه الموصلة) الخيار الوحيد لأنظمة التبريد الكهروحراريّة، ففي أنصاف النواقل يمكن التحكم بالناقليّة الحراريّة والكهربائيّة التي تتم عبر حركة الإلكترونات الحرّة - الثقوب المزدوجة.

هذه المواد متوفرة تجارياً لدى شركات عالمية متخصصة بإنتاجها مثل شركات (**MARLOW, MELCOR Corporation** من **(USA)**، و **شركة ADV-Engineering** من **Moscow-Russia** وغيرهما....

2- 2 - بنية النظام الكهروحراري Thermoelectric System Construction:

في الوقت الحاضر يوجد نمطان لتوضع العناصر الكهروحراريّة بين الصفائح السيراميكية وهذا موضّح في الشكل (2-1)، فالنمط الأول (a) هو التصميم الشائع لتطبيقات

التبريد، هنا نلاحظ أنّ العناصر الكهروحراريّة الداخليّة مفصولة بفراغات بينيـــة ولكنّهـــا متصلة من النهايات بصفائح رقيقة من النحاس (موصل كهربائي جيـــد) تـــؤمن اتـــصالاً كهربائياً وربطاً على التسلسل ومحشوة بين صفحتين من السيراميك، بينما النمط (b) وهـــو تصميم مطوّر حديثاً مستخدم في مولدات الطاقة، حيث نلاحظ كثافة البنية مع فواصل بينية صغيرة جداً بين العناصر الكهروحراريّة، فلا يفصل بينها سوى طبقة رقيقة مـــن عـــازل كهربائي والهدف من ذلك زيادة الطاقة في واحدة المساحة.



الشكل (2 – 1) يبين طرق توضع الأزواج الكهروحراريّة بين الصفائح السيراميكيّة.

كما ذكر سابقاً أنّ النظام الكهروحراري مؤلف من أزواج كهروحراريّة (مواد شـــبه موصلة) من النوعين (N -type) و(P-type)، التي توصل كهربائيّـــاً علـــى التسلـــسل وحراريّاً على التوازي وتثبّت باللحام، توضع هذه العناصر بين صفيحتين (لوحين) مـــن السيراميك، الأولى من الطرف البارد والثانية من الطرف الساخن كما هو موضّـــح فـــي الشكل (2- 3)، حيث نرى زوجاً كهروحرارياً مفرداً يتكون مـــن مـــادتين متبـــاينتين مـــن أنصاف النواقل، أولاً في حالة التبريد يكون اتجاه التيار المستمر من المادة (N-type) إلى المادة (P-type) وتتناقص درجة الحرارة T_c للموصل الداخلي ويحدث امتصاص للحرارة من الداخل عندما تنتقل الإلكترونات من المستوى الطاقي المنخفض في المـــادة (P-type) إلى الموصل المتصل بها وثم إلى المستوى الطاقي الأعلى في المادة (N-type)، أيّ يمكن القول إنّ انتقال الحرارة يتم بواسطة الإلكترونات الحرّة خلال المواد نصف الناقلـــة مـــن الوصلة الأولى إلى الوصلة الأخرى ذات درجة الحرارة T_h، حيـــث يـــتم الـــتخلص مـــن الحرارة بطرحها للوسط الخارجي ومن ثم لتعود الإلكترونات للمستوى الطاقي المنخفض.

هناك تأثير آخر مهمّ في الكهروحراريّة هو (تأثيرسيبك) الذي ينشأ عنـــدما نُحـــدث فارق حراري بين نهايتي الوصلتين ســـيتولد كمـــون كهربـــائي يـــدعى بكمـــون ســـيبك

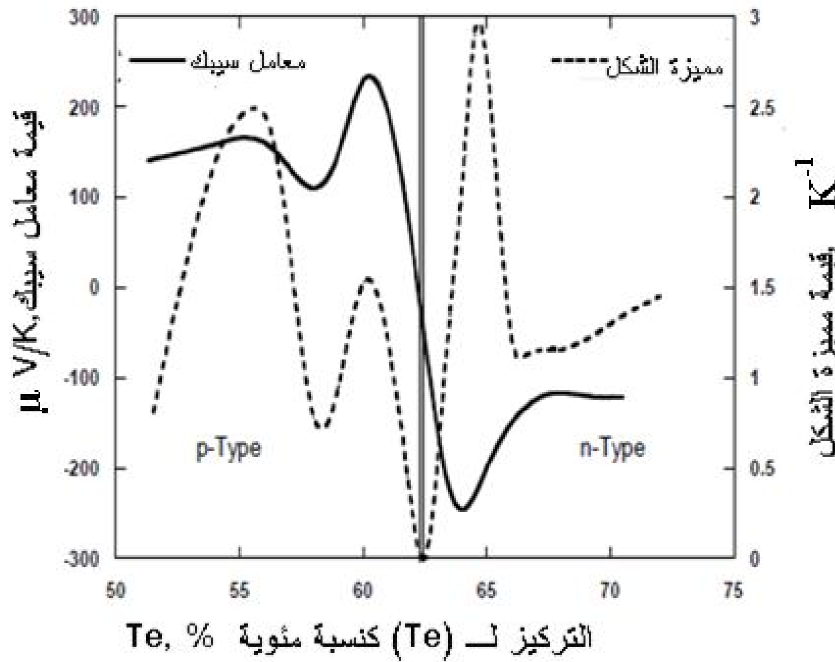
(Seebeck Voltage) وهو يتناسب مع قيمة الفارق الحراري المــشكّل، وثابــت التناســب يسمى بمعامل سيبك (Seebeck Coefficient).

وفي الحقيقة كمية الحرارة الممتصة عند النهاية الباردة أوالحرارة المنبــوذة عنــد النهاية الساخنة، تتوقف على قيمة معامل بيلتيه وشدة التيار الكهربائي المار خلال أنصاف النواقل، عملياً تتأثر الكمية الصافية للحرارة الممتصة عند النهاية الباردة بسبب تأثير بيلتيه بحرارة التلامس (التوصيل) وحرارة جول، وبسبب الفارق بــدرجات الحــرارة للمــواد نصف الناقلة عند النهايتين الباردة والساخنة تنتقل الحرارة عبر المــواد نــصف الناقلــة، وسينشأ تيار وتزداد قيمته ثم يزداد الفارق الحراري وحرارة التوصيل (الــضياع الأول) بسبب ازدياد تأثير بيلتيه التبريدي، الضياع الآخر هو حرارة جول التي تتناسب مع مربــع التيار المار، والتوازن الحراري يحدث عند الجهة الباردة عندما حــرارة بيلتيــه مــساوية لمجموع حرارة التوصيل ونصف حرارة جول، أمّا النصف الآخر فإنّــه يــذهب للنهايــة الأخرى (الجهة الساخنة)، بينما الحرارة المنبوذة الصافية عند النهايــة الــساخنة هــي مجموع الحرارة الصافية الممتصة عند النهاية الباردة إضافة للطاقة الكهربائيّة المــستهلكة في الدارة، عمليّاً يستخدم معامل الأداء COP للدلالة علــى فعاليّــة التبريــد. إنّ الــسعة التبريديّة للمواد نصف الناقلة تتعلق بمجموعة عوامل وهي (كمــون ســيبك، المقاومــة الكهربائيّة، الإيصاليّة الحراريّة إضافة لمجال الفارق الحراري بــين النهــايتين)، وعــادة يتراوح المجال الحراري الذي تعمل به المواد نصف الناقلة المستخدمة في التبريــد بــين $(-120\ ^0C \div 230\ °C)$ للسبيكة الثنائية { $(Bi\ ,Sb)_2\ (Te,Se\ )_3$ } والتي تعرف عملياً بتيليرايد البزموت (Bismuth Telluride)، والجدول (2-1) يبين خصائصها الكهروحراريّة [16].

يمكن القول إنّ بنيتها البلورية تتوضّع بشكل معيّن وإنّ الإيصاليّة الحراريّة لمادة (Bismuth Telluride) تتضمن جزأين، الأول هو الإيصاليّة الحراريّة للبنية الشبكية للمادة، والثاني الإيصاليّة الحراريّة للإلكترونات أوالثقوب، حيث أنّ الإيصاليّة الحراريّــة للبنيــة الشبكية (باتجاه موازٍ لمحورها) تساوي عند درجة حرارة عالية (k_L= 5.1 W/m.K)، الإيصاليّة الحراريّة المرتفعة للمادة (Bi_2Te_3) تتوقف على تركيز حاملات الشحنة ودرجة الحرارة وتتراوح بين W/m.K (3.5 ÷ 1.5) عند درجــة حــرارة 300 K، والإيــصاليّة الكهربائيّة تزداد مع ازدياد درجة الحرارة بسبب التهيج الحراري للإلكترونات أو الثقوب، الإيصاليّة الكهربائيّة أيضاً تتوقف على كثافة تركيــز حركــة الحــاملات، فناقليّــة كتلــة

الحاملات (مقلوب المقاومة الكهربائية النوعيّة) حوالي ($1.4 \times 10^4\ \Omega^{-1}.m^{-1}$) للمـــادة الحقيقية لـــ (Bi_2Te_3).

أما بالنسبة لمعامل سيبك وقيمة مميزة الشكل فهما يتوقفان علـــى التركيـــب البنيـــوي للمادة كما يُظهر ذلك الشكل (2 -2).



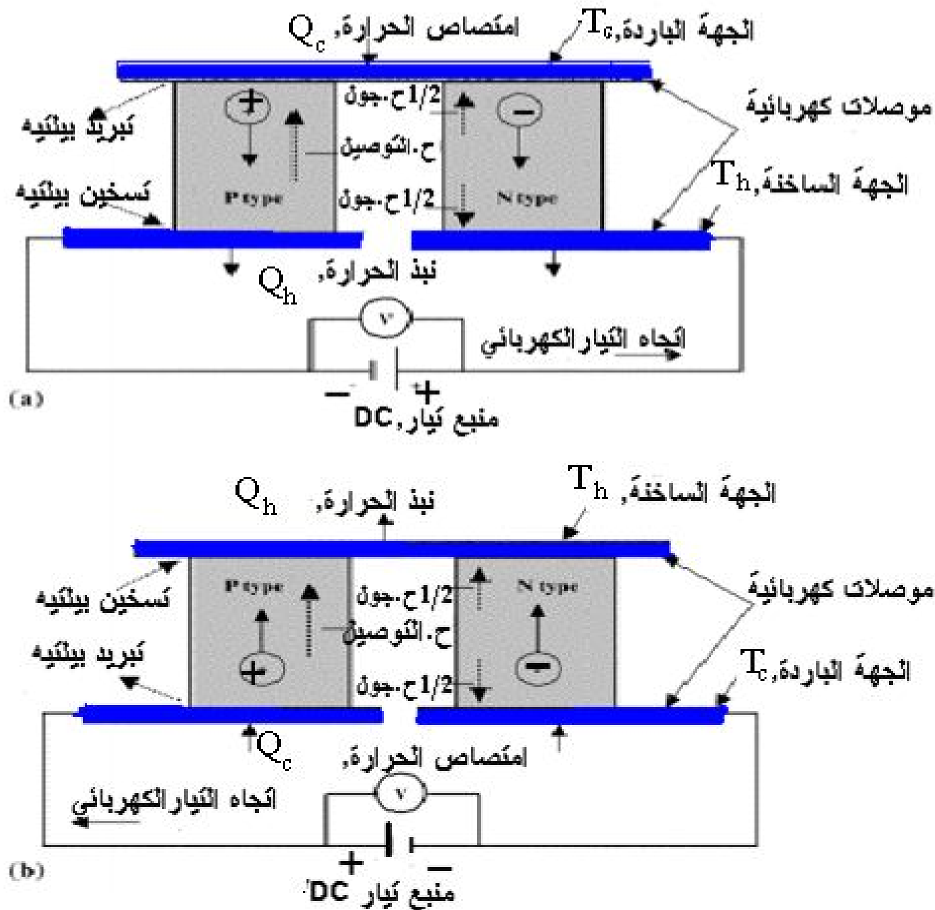
الشكل (2 -2) يبين تغير قيمتي معامل سيبك ومميزة الشكل مع تركيز Te في المادة (Bi_2Te_3).

من خلال الشكل السابق نلاحظ أنّ قيمة معامل سيبك للمادة (Bi_2Te_3) تابعة بشكل كبير لمحتوى المادة من العنصر Te، فالنوع (P-type) يملك قيمة لمعامل سيبك متزايـــدة حتى القيمة $+230\ \mu V/K$ عند تركيز 60 %، ثم ليتناقص حتى يصبح ذو قيمة سالبة عنـــد النوع (N-type)، الأمر نفسه ينطبق على قيمة مميزة الشكل للنوعين (P-type, N-type).

الجدول (2 -1) يبين الخصائص الكهروحراريّة لمادة تيليرايد البزموت مقارنة مع معدن النحاس عند درجة حرارة 298 K.

		تيليرايد البزموت (Bismuth Telluride)	
معدن النحاس Cu		P-type	N-type
المقاومة الكهربائيّة النوعيّة {(ρ) ، μΩ .m }	0.0171	8.39	6.41
معامل سيبك {(α) ، μV/K }	1.9	209	-186

الإيصاليّة الحراريّة {(k) ،W /m.K }	401	1.64	1.78
مميزة الشكل $Z.T_h$	1.57×10^{-4}	0.95	0.90



الشكل (2- 3) يبين اتجاه الضخ الحراري في النظام بتغير القطبية.

وسيتم الشرح بالتفصيل لمكونات النظام الرئيسية والمواد المستخدمة في التصنيع وكيفية التركيب والتجميع للنظام الكهروحراري.

2- 2-1- المواد شبه الموصلة Semiconductors Materials:

تسمى أحياناً بالحبيبات الصغيرة (الأزواج الكهروحرارية)، وأهم جزء في النظام، والمواد شبه الموصلة الأصلية عند إضافة شوائب إلى بنيتها الأصلية سينتج لدنيا أحد نوعين، الأوّل (P -type) والثاني من النوع (N -type)، ولكي نكوّن نظام تبريد كهروحراري يعمل بالشكل الصحيح يجب أن نجمع مواد شبه الموصلة من النوعين، ومن المعروف أنّ النوع (P -type) يفتقد للإلكترونات ولذلك يوصل بالقطب السالب للبطاريّة، أمّا النوع (N -type) ففيه وفرة من الإلكترونات الحرّة لذلك توصل بالقطب الموجب، علماً أنّ المقاومة الكهربائيّة النوعيّة للمواد شبه الموصلة تتراوح بين (0.0000001÷1000) Ω.m

ومن المواد المستخدمة في شبه الموصلات (الجرمـــانيوم e = 32، الـــسيلكون e = 14، الزرنيخ e = 81 وغيرها..) وكشروط عامة مطلوبة في المواد شبه الموصلة المـــستخدمة في التبريد الكهروحراري أن تكون جيدة التوصيل الكهربائي لتقليل الفقد في فرق الجهــد (Voltage Drop)، وأن تكون سيئة التوصيل الحراري لكي يتكوّن لــدينا فـــارق حـــراري واضـــح، هـــذه المـــواد مـــصنوعة مـــن {(B ismuth Telluride) تيليرايــد البزمـــوت} ومن {(Antimony Telluride) تيليرايد الأنتموان}، اللذين يشكلان حاليـــاً أفـــضل المـــواد الكهروحراريّة المعروفة المستخدمة بسبب الأداء المثالي لهما وخواصـــهما التكنولوجيّـــة الجيدة .

الطبقات الرقيقة (الفيلم الرقيق) للمواد الكهروحراريّـــة (P-type, N-type) ذات قيمـــة مرتفعة لمميزة الشكل، يمكن الحصول عليها بطريقـــة (Thermal Coevaporation) فـــي غرفة مفرغة تماماً وبسماكة حتى 10 µm، يبـــين الجـــدول (2 -2) خـــصائص المـــواد الكهروحراريّة عند درجة حرارة 300 K [5].

جدول (2 -2) يبين الخصائص الكهروحراريّة للمواد الكهروحراريّة المستخدمة.

الفيلم الرقيق	Te	Sb أو Bi	معامل سيبك $\mu V/{}^{0}C$	المقاومة الكهربائيّة النوعيّة $\mu\Omega.m$	مميزة الشكل 300K*
Bi_2Te_3	62 %	38 %	-248	12.6	0.86
Sb_2Te_3	73 %	27 %	188	12.6	0.49

- تم فرض قيمة الإيصاليّة الحراريّة (1.7 W/m.K) عند الحساب.

2 -2 -2- الصفائح السيراميكية Ceramics plates:

حيث تكون إحداها باردة والأخرى ساخنة تحصر بينها الأزواج الكهروحراريّة- أنظر الشكل (2-1)- ويمكن أن تكون هنالك صفيحة متوسطة عندما يكون النظام متعدد الطبقات، وهذه الصفائح السيراميكية توفّر الحماية للنظام الكهروحراري وتضمن سلامة التجهيـــزات الكهربائيّة الأخرى كما تؤمن العازليّة الكهربائيّة للنظـــام، ولكـــي يكـــون هنـــاك تبريـــد (امتصاص ونبذ للحرارة) يجب أن تكون جيدة الإيصاليّة الحراريّة لتأمين انتقال الحـــرارة بيسر وأقل مقاومة، ومن هذه الأنواع (سيراميك) أوكسيد الألمنيوم (AL_2O_3) المـــستخدم بشكل واسع بسبب السعر والعمل المثالي وتطور تقنيات تشغيله، أمّا الأنواع الأخرى مـــن السيراميك مثل نتريـــد الألمنيـــوم (Alumina Nitride -ALN) و (Beryllia) ذو الـــصيغة

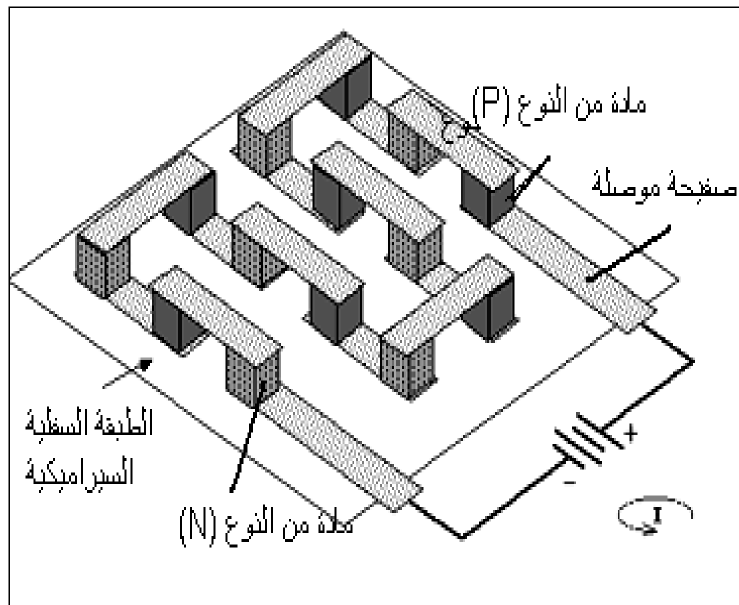
(BeO) فهي أيضاً مستخدمة وهي تملك إيصاليّة حراريّة أفضل بـــ 5 أو 7 مرّات أكثر من (AL_2O_3) لكنهما غاليي الثمن، بالإضافة إلى أنّ (BeO) تكنولوجيـــاً خطـــر، يبـــين الجدول (2 – 3) الخصائص الفيزيائيّة لهذه المواد [17].

الجدول (2- 3) يبين الخصائص الفيزيائيّة لبعض المواد السيراميكيّة.

المادة	الكثافة $kg/m^3(x10^{+3})$	الإيصاليّة الحراريّة W/m.K	معامل التمدد الحراري 10^{-6} / K	المقاومة الكهربائيّة النوعيّة Ω.m
AL_2O_3	3.89	35	8.4	10^{12}
BeO	2.85	248	7.2	10^{5}
ALN	3.26	180 ÷140	4.5	$>10^{12}$

2- 2- 3- الموصلات الكهربائيّة Electrical Conductors:

تربط على التسلسل لتؤمن اتصالاً كهربائيّاً بين عناصـــر المـــواد شـــبه الموصـــلة جميعها، أيّ تربط الجزء الساخن للعنصر الكهروحراري الأوّل مع الجزء البارد للعنـــصر التالي واتصالاً رئيسيّاً مع أسلاك التوصيل الكهربائيّة الرئيسية (Leading Wire) كما هـــو مبين في الشكل (2- 4)، هذا وفي أغلب نماذج الاستطاعات المنخفضة، الموصلات تصنع على شكل طبقة رقيقة (فيلم رقيق- Thin Film)، بينما في البنية متعددة الطبقات تحتـــوي على عنصر النحاس كمادة موصلة متوضّعة على الصفائح السيراميكيّة، بمعنى آخر لأجل نماذج الاستطاعات العالية تكون الموصلات مصنوعة مـــن النحـــاس النقـــي (Cu Tabs) لتخفيض المقاومة.



الشكل (2- 4) يبين كيفية توضع الموصلات الكهربائيّة.

الجدول (2- 4) يبين القيم المختلفة للإيصاليّة الحراريّة للمعادن المستخدمة كموصلات كهربائيّة في النظام الكهروحراري [9].

الجدول (2- 4) يبين قيمة الإيصاليّة الحراريّة للمعادن المختلفة.

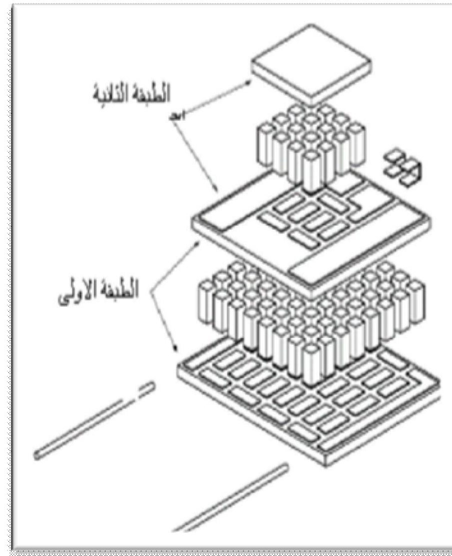
المعدن	**الإيصاليّة الحراريّة (W/m.° C)**
الألمنيوم	205
النحاس	386
الذهب	315
خليطة بلاتينيوم % 90 ، راديوم % 10	31
بلاتينيوم	70.9

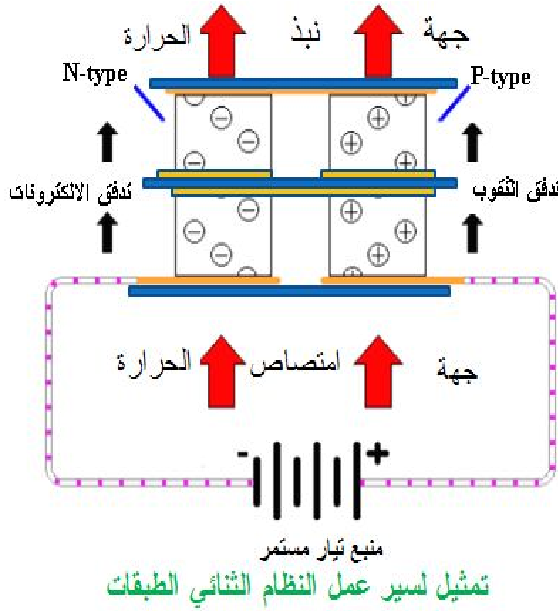
2- 2- 4- طريقة اللحام Solders Method:

تستخدم عملية اللحام لتجميع أجزاء الوحدة الكهروحراريّة تجميعاً جيداً، كما يجب أن تحدّد نقطة ذوبان اللحام أعلى من درجة حرارة التشغيل للوحدة لضمان عمر تشغيلي طويل، وتتصل أسلاك التوصيل الرئيسيّة (Leading Wires) مع نهايات الموصلات لتنقل التيار الصادر من المنبع الكهربائي، فلتجميع النموذج الأحادي أو النموذج المتعدد الطبقات { الذي يتضمن طبقتين كالشكل (2- 5) أو أكثر من المواد شبه الموصلة، وتكون الطبقة فوق الأخرى، وبناء النظام المتعدد الطبقات يكون ذو شكل هرمي، الطبقة الأدنى تكون أكبر من الطبقة العليا بعدد الأزواج الكهروحراريّة وبالمساحة، وتستخدم الطبقة الأعلى لغاية للتبريد (امتصاص حرارة)، والطبقة الأدنى تتطلب مساحة واسعة لسرعة طرح الضخ الحراري الذي يمتصّ من الطبقة الأعلى } نستخدم اللحام بطريقة تقلل الإجهادات.

لتقليل قيمة مقاومة التلامس بين العناصر الكهروحرارية وصفائح الموصل الكهربائي (النحاس)، تتم قصدرة العناصر بطبقة رقيقة من النيكل وقصدرة صفائح النحاس بطبقة رقيقة من سبيكة (Sn % 30, Bi % 70) قبل لحامها بطبقة من طريقة (Sn % 10, Bi % 90) ، ونستخدم طبقة رقيقة من البزموت بين العناصر الكهروحرارية وصفائح النحاس بهدف خفض الإجهادات الحرارية الناشئة عن تواجد الوصلات عند درجات حرارة مختلفة، ومن شروط اللحام الجيد أن تكون نقطة ذوبان اللحام للجوانب الخارجية دائماً أدنى من اللحام الداخلي في الوحدة الكهروحراريّة، وزمن اللحام يفضل أن يكون قصيراً ما أمكن لتخفيض فترة الارتفاع الحراري للوحدة الكهروحراريّة، ولا ينصح

باستعمال اللحام بطول خطوة للطرف الجانبي أكثر من 15 mm بسبب تولّد الإجهادات الحرارية، مادة الغراء تستخدم على نحو واسع بسبب بساطتها، وعادةً مواد Epoxy (مواد لاصقة) تملأ الفراغات بين المواد المتصلة حرارياً، مثل مسحوق الغرافيت، مسحوق الفضة (Silver)، نتريد سيلكون (SIN)، من جهة ثانية بعض الأبوكس لها درجة حرارة تشغيل منخفضة غير مناسبة لحرارة التشغيل العالية لنماذج الـ TEC، وبالتالي نجد أنّها طريقة مناسبة لتطبيقات الإفراغ العالية لأنّ الأبوكس يعاني مشاكل مع إفراغ الغازات.





الشكل (2 - 5) يبين نظام تبريد كهروحراري ثنائي الطبقات (طريقة العمل – مكونات النظام).

2- 3- الأداء The Performance:

نماذج (وحدات) الـ TEC يمكن أن تتميز بمتغيرات أداء كدرجة حرارة الوصلة الساخنة T_h وعموماً هذه قائمة بالمواصفات القياسية لأحد النماذج [6] :

– ΔT_{max} (^0C) : فرق درجة الحرارة الأعظمي للنموذج (بين الجهتين) عند حمل حراري Q = 0 W، وقيمة $\Delta T_{max} = 70\ ^0C$ لنموذج كهروحراري مؤلف من طبقة واحدة عند درجة حرارة وسط خارجي $27\ ^0C$, $\{ \Delta T_{max} = (T_h - T_c)_{max} \}$.

– $Q_{c\ max}$ (W) : سعة التبريد الموافقة لعمل عند $\Delta T_{max} = 0$ و $I = I_{max}$.

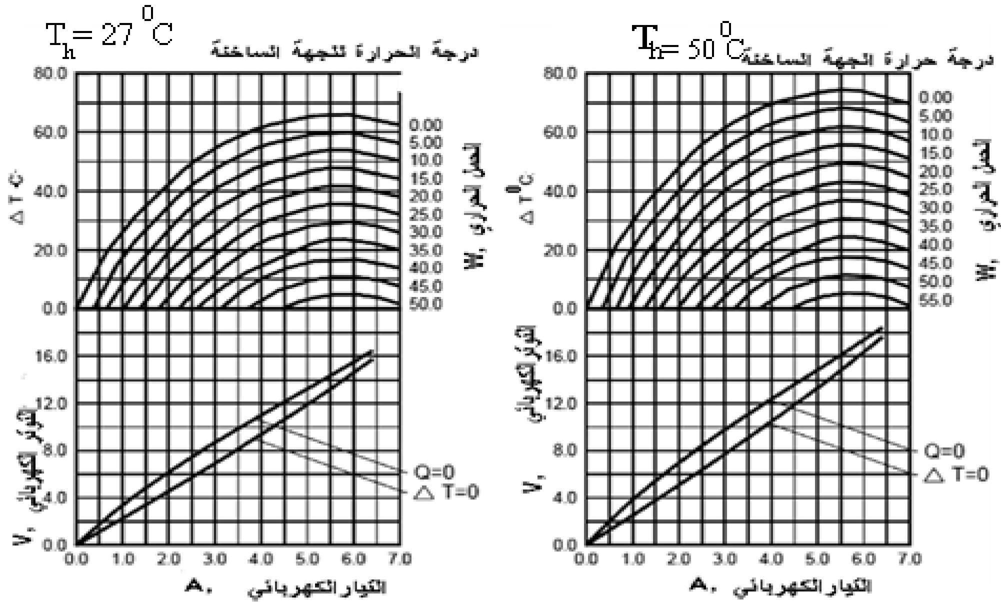
– I_{max} (A) : التيار الـ DC المار في النموذج عند ΔT_{max} والحمل Q = 0 W.

– V_{max} (V) : التوتر (فرق الكمون) الحدي لأجل I_{max} وبدون حمل حراري.

متغيرات الأداء السابقة هي مترابطة بعلاقات فيما بينها والاختيار الصحيح لأجهزة الـــ TEC في تطبيق واقعي (يمكن أن يتم) باستخدام مخططات الأداء.

2- 4- مخططات الأداء الأعظمي Maximum Performance Plots:

مخططـــات الأداء الأعظمـــي تـــشير إلـــى العلاقـــة المترابطـــة بـــين (ΔT_{max} ,Q_{max} , V_{max} , I_{max})، يمكن دراسة هذه المنحنيات من خلال الــشكل (2- 6)، التي تعود للوحدة الكهروحرارية (DT 12 - 6) من شركة MARLOW الأمريكيّة [11]، وهذه الوحدة تحوي على 127 زوجاً كهروحرارياً مترابطاً على التسلسل، أبعــاد الوحــدة (40 mm x 40 mm) ومصممة للعمل حتى درجة حرارة $150\ ^0C$.



الشكل (2- 6) مخططات الأداء الأعظمي للنظام.

إنّ المخططات السابقة المزوّدة من قبل الشركة الصانعة مثّلت في حالتين، الأولى بدرجة حرارة (T_h= 27 ^{0}C = 300 K) والحالة الثانية بدرجة حرارة (T_h=50 ^{0}C = 323 K)، ففي كل حالة يمكن من خلال المخططات الحصول على TΔ كتابع للتيار الكهربائي المطبق ولأجل قيم مختلفة لـ Q_c، هناك مخططات أخرى للحصول على فرق الكمون الكهربائي اللازم كتابع للتيار الكهربائي. المخططات السفليّة مثّلت بحدي القيم القصوى TΔ = 0 و Q_c = 0 بما أنّ كل الحالات تقع ضمن هذه القيم وبتطبيق المعادلة:

$$V = \alpha.\Delta T + \beta.I \quad (2 -1)$$

ومن خلال المنحني السفلي يمكن الحصول مباشرة على قيمة β وبفرض $T\Delta = 0$ تصبح المعادلة السابقة $\beta = V/I$ تمثل المقاومة الداخلية وهي ثابتة عند درجة حرارة ثابتة، وقيمتها للحالتين المدروستين $\beta = 2.431\Omega$ عند $T_h = 300$ K وتساوي $2.769\ \Omega$ عند $T_h = 323$ K.

2- 5- مميّزة الشكل (رقم الاستحقاق) Figure of Merit:

إنّ فعاليّة تحويل الطاقة أو معامل الأداء COP لأجهزة التبريد الكهروحراريّة تحـــدد بقيمة مميزة الشكل (Figure of Merit) للمواد الكهروحراريّة المستخدمة، وتسمى أحيانـــاً برقم الاستحقاق، عموماً يرمز لها بـــ Z والقيمة الأكبر لها تكون للطبقـــات الرقيقـــة جـــداً للمواد $(Bi_2Te_3\ /\ Sb_2Te_3)$ فالمبرّدات المكوّنة على أساس المواد الكهروحراريّـــة الـــسابقة تملك قيمة لمعامل الأداء حوالي 2 وهو أقل من قيمة معامل الأداء بـــ (4 أو 6) مـــرّات العائد للمبرّدات القائمة على أساس دارة انضغاط البخار عند العمل بنفس الشروط [18].

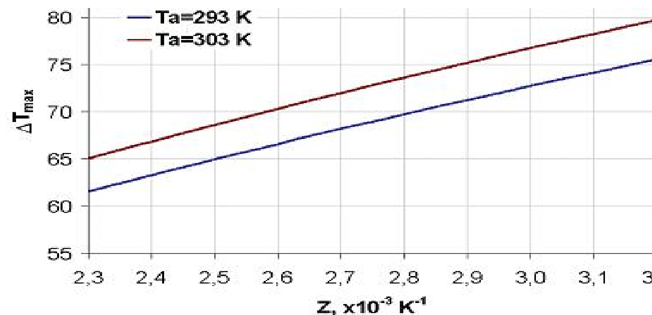
هناك العديد من متغيرات الأداء التي لا تظهر عـــادةً فـــي المواصـــفات القياســـية للوحدات الكهروحرارية التجاريّة لكنها تلعب دور مهمّاً فـــي خـــصائص الوحـــدة، هـــذه المتغيرات هي الخصائص المعدنية للصفائح (كالإيصاليّة الحراريّة k، المقاومة الكهربائية R ومعامل سيبك α وترتبط فيما بينها بعلاقة تحدّد ما تسمّى بمميزة الشكل كالتـــالي :

$$Z = \alpha^2 / k.R \qquad (2\text{-}2)$$

المعامل Z يدل على مميزة الشكل (تسمى أحياناً برقم الاستحقاق)، والقيمة الاســـميّة (النموذجية) له $Z = (2.5 \div 3.0) \times 10^{-3}\ K^{-1}$, والمعروف أنّ قيمة Z دائماً تقـــيّم ΔT_{max} في نظام أحادي الطبقة من خلال العلاقة التالية:

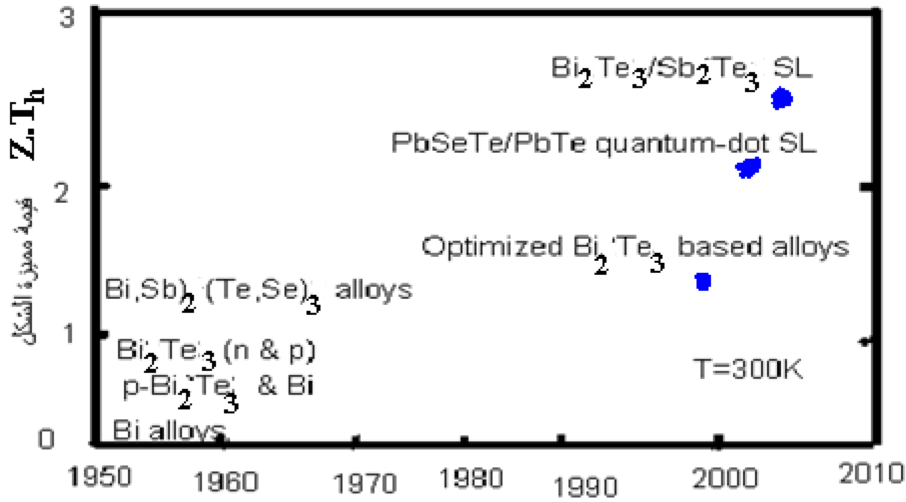
$$\Delta T_{max} = \frac{1}{2} Z T_a^2 \qquad (2\text{-}3)$$

حيث T_a درجة حرارة الوسط الخارجي، وعلاقة درجة الحرارة مع (Z ، ΔT_{max}) موضّحة في الشكل (2- 7).



الشكل (2 - 7) يبين العلاقة بين Z , ΔT_{max} .

ويمكننا أن نبين التطور الحاصل في قيمة مميزة الـشكل للمـواد المـستخدمة فـي الكهروحراريّة بالشكل (2- 8)، والذي يظهر الخلائط المستخدمة وقيمة مميزة الشكل لهـا عند درجة حرارة للوسط الخارجي (المحيط) K 300 [4].



الشكل (2- 8) يبين التطور الحاصل في قيمة ($Z.T_h$) للمواد الكهروحراريّة.

2-6 - اختبــــارات الوثوقيـــــة القياســــية Reliability Tests Standards:

الوحدات الكهروحراريّة التجاريّة تصمم لعمر تـشغيلي طويـل وبمجـال يتـراوح بـين (100 ÷ 200) ألف ساعة عمل، وبالنتيجة هي تكنولوجيا عالية التطور بمـواد أوليّـة ذات نوعية جيدة، لأجل هذه الغاية هناك العديد من الاختبارات القياسية المحلية والدولية، وهـي موّحدة بمجال الأجهزة الإلكترونيّـة والإلكتروضـوئيّة فـي الأسـواق العالميـة مثـل (MIL- STD- 883)، ومثل Bell core القياسي هو الأكثر انتشاراً ويسمى GP-468-CORE (**ضمان الوثوقية للأجهزة الإلكتروضوئية** – Reliability Assurance for Optoelectronic Devices)، والاختبارات التي تجرى للوحدة الكهروحراريّة قبل الاستخدام:

- اختبار الصدم الميكانيكي Mechanical Shock Test.
- اختبار الاهتزازات Vibration Test.
- اختبار قوى القص Shear Force Test.
- اختبار اختزان موجات الحرارة العالية High Temperature- Storage Test.
- اختبار تحمل دارة درجات الحرارة Temperature – Cycle Endurance Test.

2-7- اختيار وحدة TE لتطبيق ما Selection of TE Module For an Application:

إنّ أيّ تطبيق معين يستخدم وحدة كهروحراريّة تكون له متطلبات خاصة بمتغيرات العمل، وحدود التشغيل الضرورية للاختيار الصحيح للوحدة من بين مجال واسع من الوحدات المتوفرة (أحاديّة أو متعددة الطبقات)، وهذه المتغيّرات التي يتوجب معرفتها أثناء اختيار الوحدة لتطبيق معين هي:

- ΔT (^{0}C): فرق درجات الحرارة أثناء العمل (درجة حرارة الوسط الخارجي T_a، درجة حرارة الوصلة الساخنة T_h).
- Q (W): سعة التبريد التشغيليّة {الحمل الحراري أو كمية الحرارة المراد امتصاصها عند الجهة الباردة (Q_C)}.
- I (A): التيار المستخدم للتطبيق.
- V (V) : التوتر الحدي (الكمون المطبق) بين النهايات.
- ضوابط وحدود العمل.

يمكن بشكل أولي التقدير السريع لاختلاف درجة حرارة التشغيل وسعة التبريد بالعلاقة التالية:

$$Q = Q_{max}(1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}) \quad و \quad \Delta T = \Delta T_{max}(1 - \frac{Q}{Q_{max}}) \qquad (2 - 4)$$

بينما التحليل التفصيلي يجب أن ينجز بمساعدة منحنيات الأداء، في الجدول (2- 5) قائمة بالنماذج (الوحدات) التجاريّة الكهروحرارية المعروفة فيما يتعلق بمطلب الفارق الحراري للنموذج ذي الطبقة الواحدة من المواد شبه الموصلة، وهنا ΔT_{max} يتراوح بمجال من 65 K حتى 72 K, أما النماذج ذات الطبقتين أو أكثر فإنّها يمكن أنّ تعطي فارقاً حرارياً أكبر، وهذا سيناقش بشكل مفصّل في الفصل الرابع.

الجدول (2- 5) قائمة بالنماذج التجاريّة (أحاديّة وثنائيّة الطبقات) المعروضة من شركة (RMT. Ltd) الروسية.

النموذج	$\Delta T_{max}, K$	Q_{max}, W	I_{max}, A	U_{max}, V
	Single Stage			
1MT 03-004-13	67	0.10	0.40	0.45
1MT 03-008-13	67	0.19	0.40	0.90
1MT 03-012-13	67	0.29	0.40	1.35
1MC 04-004-05	68	0.44	1.60	0.50
1MC 04-018-15	68	0.53	0.40	2.20
1MC 04-032-15	68	0.94	0.40	4.00
1MT 04-128-12	65	6.20	0.80	14.50
1MT 05-004-13	67	0.26	1.10	0.45
1MT 05-008-13	67	0.52	1.10	0.90
1MT 05-032-13	67	2.10	1.10	3.60
1MT 05-128-13	67	8.45	1.10	14.50
1MC 06-008-15	73	0.72	1.30	1.00
1MC 06-012-15	73	1.08	1.30	1.50
1MC 06-018-15	73	1.63	1.30	2.20
1MC 06-032-15	73	2.89	1.30	3.90
1MC 06-032-05	68	7.71	3.60	3.90
1MC 06-060-05	68	14.40	3.60	7.30
1MT 06-128-13	67	12.50	1.60	14.50
1MT 07-004-13	67	0.50	2.00	0.45
	Two Stage			
2MC 06-015-15	98	0.38	1.00	1.30
2MC 06-039-15	102	0.85	1.10	3.60
2MC 06-077-15	100	1.82	1.10	7.00
2MC 06-077-05	93	4.80	2.90	7.00
2MC 10-009-15	101	0.58	3.00	0.80
2MC 10-019-20	103	0.90	2.30	1.80
2MC 10-037-20	102	1.78	2.30	1.80
2MC 10-041-20	96	2.26	2.10	3.50
2MC 10-075-20	101	3.80	2.20	3.50

في كل مجموعة (نماذج أحاديّة أو متعددة الطبقات) هناك نمـــاذج مختلفـــة الـــسعة التبريديّة Q_c، حيث يكون المطلوب قدرة أكبر والقياسات الكبيرة لـــ TEC يمكن أنّ تجهّز

بمضخة حرارية، إذا أخذنا بعين الاعتبار الضياع (المسموح) في الطاقة المـــزودة فـــإنّ الاختيار الصحيح يمكن أن يصبح إلى حد ما مهمة صعبة، لذلك علـــى الأغلـــب ينـــصح بالتزوّد بنوع من المساعدة .إنّ بعض هذه النصائح هو استخدم برامج تشغيل (Software) المخصصة للبحث بين نماذج TEC وإقرار الاختيار المثالي باستخدام معلومات الكمبيوتر لشرح مكونات أنواع النماذج الكهروحرارية بشكل مفصل، على ســـبيل المثـــال بـــرامج التشغيل التي تعود للشركات RTM و MELCOR و KRYOTHERM .

2- 8 - معلومات مفيدة للتطبيقات Application Tips:

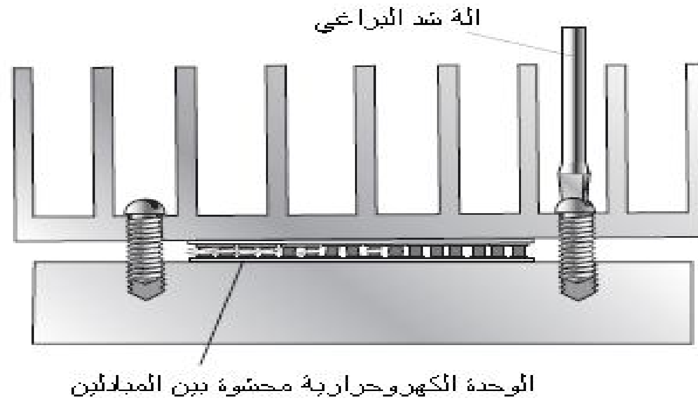
عادةً الأداء والعمر الزمني للتشغيل للوحدات الكهروحرارية TE متوقف إلى حد كبير على عوامل عديدة وهي كالتالي:

2- 8-1 - التركيب Mounting:

التركيب هو أول إجراء قبل أي تطبيق للوحدات الكهروحراريـــة فطريقـــة التركيـــب ولوازم التطبيق يجب أن تستخدم بحرفية جيدة.

2- 8-2- التوضّع الميكانيكي Mechanical mounting :

وحدات TEC تتوضّع بين مبادلين حراريين (ماص حرارة / نابذ حـــرارة)، هـــذا التوضّع يثبت ببراغٍ أو أي طريقة ميكانيكية أخرى، ميزة التثبيت ببراغ كما فـــي الـــشكل (2- 9) تعني إمكانية سرعة وسهولة الفك وهي مناسبة لعدد كبير من الوحدات على ســـبيل المثال لسطح خارجي قياسه (30 mm x 30 mm) أو أكثر والأنواع الصغيرة تتطلب طرق تركيب مختلفة.



الشكل (2- 9) يبين طريقة التوضّع الميكانيكي للوحدة الكهروحراريّة.

2- 9 - الأجهزة المساعدة Accessories:

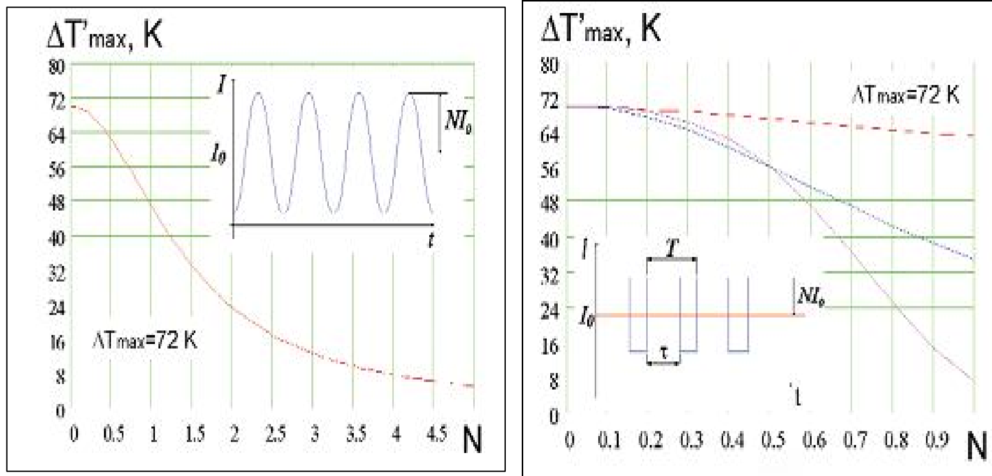
تتضمن الأجهزة المساعدة لنظـــام التبريـــد الكهروحـــراري مثـــل منـــابع التغذيـــة (Power Supplies)، ومتحكّمات بدرجة الحرارة (Temperature Controllers)، والمبادلات الحراريّة التي تساعد على طرح الحرارة (Heat Exchangers)، والمواد التي توضع بـــين السطوح المتلامسة (Thermal Interface Materials) وسنقوم بشرحها بالتفصيل:

2- 9- 1- التغذية بالطاقة Power Supply:

أنظمة الـــ TEC هي أجهزة تتطلب تياراً DC ناعماً ثابتاً (خاليـــاً مـــن التموّجـــات) لتحقيق أداء مثالي، أي يكون أداء الوحدات الكهروحراريّة جيداً إذا استخدم منبع التغذيـــة DC المناسب، وهو أحياناً بطارية مع محوّلات طاقة كما في الشكل (2- 11) ومـــزودات الطاقة مع دارات مراقبة درجة الحرارة مثل متحكم (PI , PID)، إنّ عدم الفلترة الكاملـــة من قبل المصحح للتوتر AC يؤدي لمعامل تموّج (Ripple Factor) % 48 تقريباً، وهـــذا يمكن أن يؤدي إلى تناقص أداء النظام الكهروحراري بنسبة أكثر من % 32، بينما معامل التموّج أقل من % 10 سيؤدي إلى نقص أقل من % 1 في الفارق الحراري الحاصل، مع العلم أنّ طاقة العمل للمبرّد الكهروحراري تتراوح بين مئات الميلـــي واط حتـــى مئـــات الواطات بينما التيار الكهربائي الأعظمي عادة أقل من A 10 . انخفاض أداء TEC بـــسبب هذه التموّجات { أنظر الشكل (2 - 10)} ، يمكن بشكل تقريبي أن نكتب:

$$\Delta T'_{max} / \Delta T_{max} = \frac{1}{1 + N^2/2} \qquad (2\text{-}5)$$

حيث N مدى التموّج لقيمة التيار الوسطية.



الشكل (2- 10) يبين تأثير تموّج التيار الكهربائي على $\Delta_{max}T$.

نجد من الشكل الأوّل (2- 10) تناقصاً كبيراً في الفارق الحراري بين وصلتي نظــام التبريد الكهروحــراري (المنحنـــي بـــاللون الأحمـــر) عنـــدما لا يكـــون هنـــاك مقـــوّم (Rectifier) للتيار الكهربائي (تموّجات كبيرة للتيار المغذّي للنظام)، بينما نجد في الشكل الثاني تناقصاً محدوداً في هذا الفارق المشكّل بين وصلتي النظام عند استخدام مقوّم عنـــد مدخل التيار للنظام (تحويله لتيار مستمر). إنّ طاقة الدخل من أجل المردود الأعظمي لا تتوافق مع جهد العمل الأعظمي والتيار الأعظمي، فعندما يُطلب الحصول على المـــردود الأعظمي فإنّ الطاقة المطبقة إجمالاً $(\frac{1}{3} \to \frac{2}{3})$ من معدّل الطاقة الأعظميّـــة الحقيقيـــة المطلوبة ومعادلة التيار هي:

$$I_T = I + I_{max}.\sin(\omega \tau) \qquad (2\text{-}6)$$

حيث أنّ I هي القيمة الوسطية للتيار، ω− زاوية التموّج ومعادلتها $\omega = 2.\pi.F$ وهنا F قيمة التردد، و τ الزمن.

ومما يلاحظ أنّ تموّج التيار لا يؤثر على حرارة بيلتيه وعلـــى حـــرارة طومـــسون وذلك لأنّهما يتوقفان على اتجاه التيار، فخلال قسم الدارة $\{I_{max}.\sin(\omega \tau)\}$ يـــتم طرد حرارة بينما يصاحب الجزء $\{-I_{max}.\sin(\omega \tau)\}$ امتصاص حرارة مساوية، ويلاحظ أنّ تموّج التيار يؤثر على حرارة جول وحرارة مقاومة التلامس وذلك لأنّهمـــا لا يتوقفان على اتجاه التيار الكهربائي وعند أخذ التموّج في الاعتبار تصبح معادلـــة الطاقـــة لحرارة جول:

$$Q_J = I^2.R_{P,N}(1 + \phi^2).f \qquad (2\text{-}7)$$

وحيث أنّ $(R_{p,N} = R_P + R_N)$ هي المقاومة الكهربائيّة للزوج الكهروحراري وتساوي مجموع مقاومتي المادتين (N-Type, P-Type)، و φ عبارة عن معامل التموّج ومعادلته:

$$\varphi = (I_{max}/I.\sqrt{2}) \qquad (2\text{-}8)$$

وf عبارة عن معامل مقاومة التلامس ومعادلته:

$$f = (R_S + R_{C,p})/(R_P + R_N) \qquad (2\text{-}9)$$

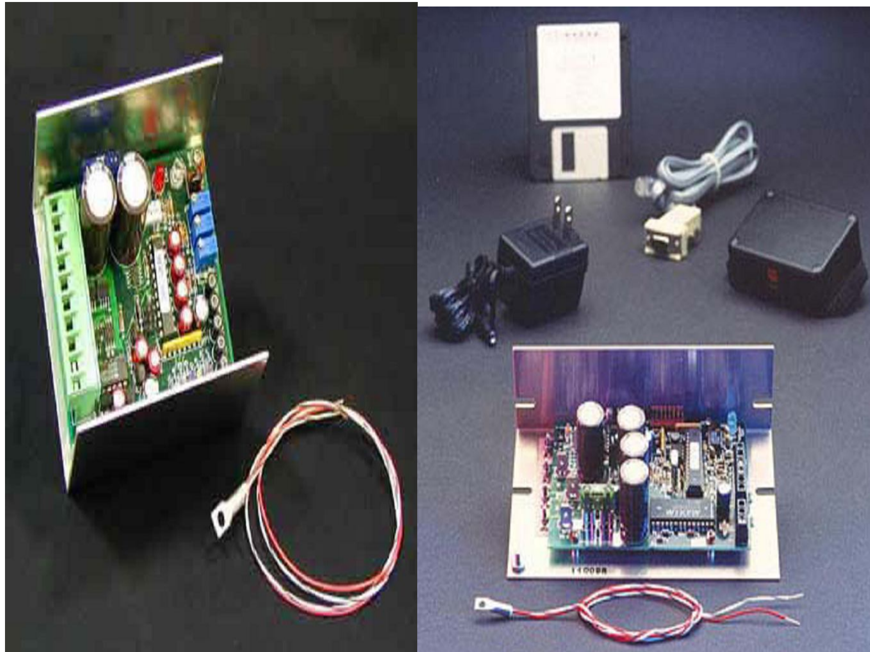
وحيث أنّ $R_{C,P}$, R_S هما مقاومة صفائح الموصل (النحاس) ومقاومة لحام الوصلة.



الشكل (2- 11) يمثل محولات الطاقة لأجهزة التبريد الكهروحراري.

2- 9- 2- متحكّمات درجة الحرارة Temperature Controllers:

المتحكّمات بدرجة الحرارة ضرورية للتطبيقات التي تتطلب دقة عالية بضبط الحرارة ، فالمنظمـــات التناســـبية الخطيـــة مثـــل المتحكّمـــات { PI (Proportional -Integral) } الشكل (2- 12) أو{ PID (Proportional-Integral-Derivative) } مناسبة للاستعمال مـــع الأنظمة الكهروحراريّة، المنظم (المتحكّم PI) ملائم للعمل عندما يكون الحمـــل الحـــراري ودرجة حرارة الوسط الخارجي بتغيّرات واسعة، أمّا المتحكّم (PID) فهو أكثر تعقيداً من السابق ويستخدم عندما يكون الحمل الحراري المزال كبيراً مع تحكم مباشر بـــه، وبهـــذه المتحكّمات بدرجة الحرارة نستطيع الحصول على دقة ضـــبط أقـــل مـــن ($0.01\ ^0C$) وأحياناً حتى أقل من ($0.001\ ^0C$).

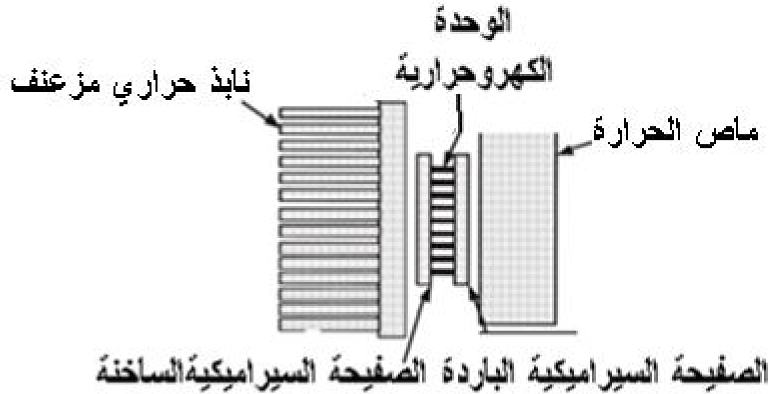


PI PID

الشكل (2- 12) يبين بعض أنواع المتحكّمات المستخدمة في أنظمة التبريد الكهروحراري.

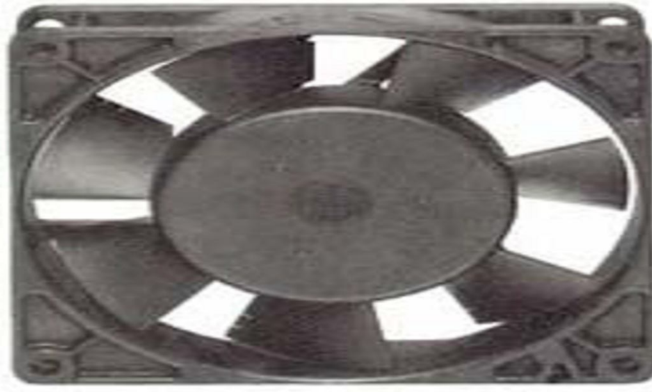
2- 9- 3- المبادلات الحراريّة Heat Exchangers:

إنّ أيّ جهاز تبريد كهروحراري يعمل بدرجة حرارة تشغيلية أكبر من مجال عمله قد يسبب تلفه، لهذا السبب كل المبرّدات الكهروحراريّة تتطلب تصميم مبادل (ماص) حراري (Heat Sink) بشكل مناسب لعملية نبذ الحرارة الممتصة أو المطرودة عبر الوصلتين (الطرفين)، فبناء عليه وحدة التبريد الكهروحراريّة مؤلفة من ثلاثة عناصر رئيسية، هي وحدة بيلتيه ونابذ حراري يركب على الجهة الساخنة للوحدة والعنصر الثالث هو ماص الحرارة يركب على الجهة الباردة للوحدة كما يُظهر ذلك الشكل (2- 13).



الشكل (2 - 13) يبين توضع النوابذ الحراريّة على جانبي الوحدة الكهروحراريّة

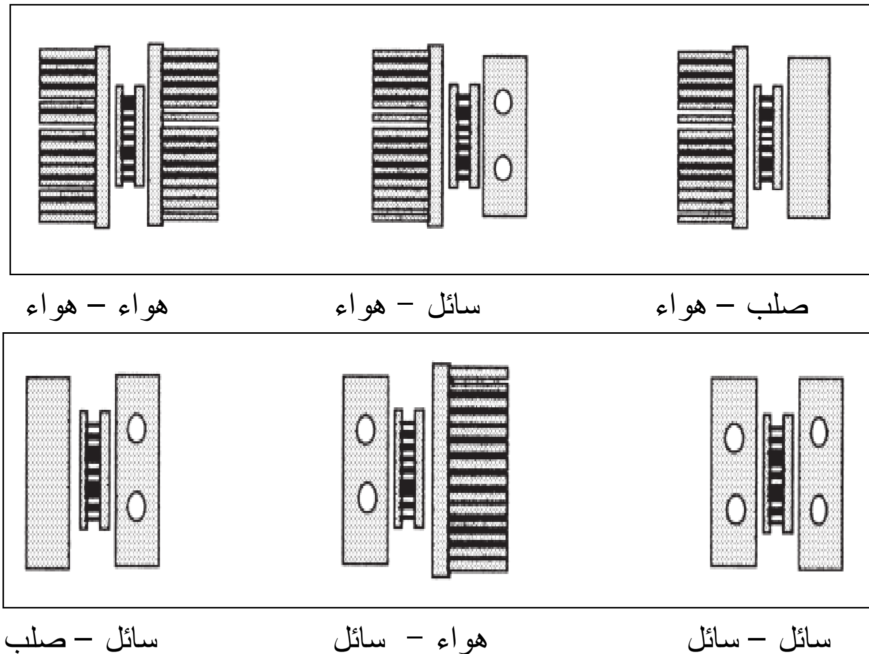
فالجسم المطلوب تبريده يمكن أن يوصل مباشرة بالطرف البارد من الصفيحة السيراميكيّة لوحدة التبريد الكهروحراريّة أو يمكن تبريده عبر مبادل حراري (Heat Exchanger) باستخدام وسيط تبريدي أو باستخدام مروحة الهواء البارد، والأمر نفسه يمكن أن يطبق على الطرف الساخن حيث يمكن تركيب مبادل حراري لنبذ الحرارة للخارج بشكل أسرع وأكثر فعاليّة عبر استخدام وسيط تبريد أو مروحة الهواء الساخن، في الشكل (2- 15) نرى تصميمات مختلفة لعملية النبذ الحراري للنظام الكهروحراري، هنالك ثلاثة تصاميم أساسية لماص الحرارة تستخدم في حالة الحمل الحراري الحر أوالحمل القسري { استخدم مراوح مثلاً لتساعد على سرعة انتقال الحرارة كما في الشكل (2- 14) أوالتبريد بالسوائل}، أما عن قيم مقاومة النوابذ الحراريّة المأخوذة من أغلب المراجع العلميّة والشركات الصانعة فهي للحمل الحر من { ^{0}C / W (5 ÷ 0.5) } وللحمل القسري {^{0}C /W (0.5 ÷ .002)} ولحالة التبريد بالسائل {^{0}C / W (0.15 ÷ 0.005)}، ويحدد الفارق الحراري عادة بين ماص الحرارة والوسط الخارجي بين ^{0}C (20 ÷ 10).



الشكل (2- 14) يمثل مروحة تبريد لنظام كهروحراري.

إنّ تصميم واختيار الماص الحراري له دور مهمّ وكبير في حالة الحمل الأعظمي للتشغيل، فهو يجب أن يكون مصمماً لتخفيض المقاومة الحراريّة أثناء عملية نقل الحرارة، وهذا ممكن بزيادة مساحة سطح النابذ الحراري أو استخدام أنابيب حراريّة لتـــأمين النقـــل الحراري الفعّال، وكما يمكن استخدام ماص حرارة يملك سعة تخـــزين حـــراري عاليّـــة لتساعد على حفظ درجة حرارة الماص الحراري أقل من الوصلة الساخنة لوحدة بيلتيـــه، هذا الحل الأخير يسمى استخدام مواد متغيرة الطور(Phase Change Materials - PCM).

وهذه المواد مرشّحة بقوة للاستخدام في أنظمة التخزين الحـــراري بـــسبب كثافتهـــا الطاقيّة العالية (MJ/m^3) بالإضافة إلى إنّه في هذه المواد تتم عملية انتقال الحرارة طبيعياً عند درجة حرارة ثابتة (العبور الحراري). وهذا يلائم أنظمة التبريد الكهروحراري.



الشكل (2 - 15) يبين التصاميم المحتملة للنوابذ الحراريّة على طرفي الوحدة الكهروحراريّة.

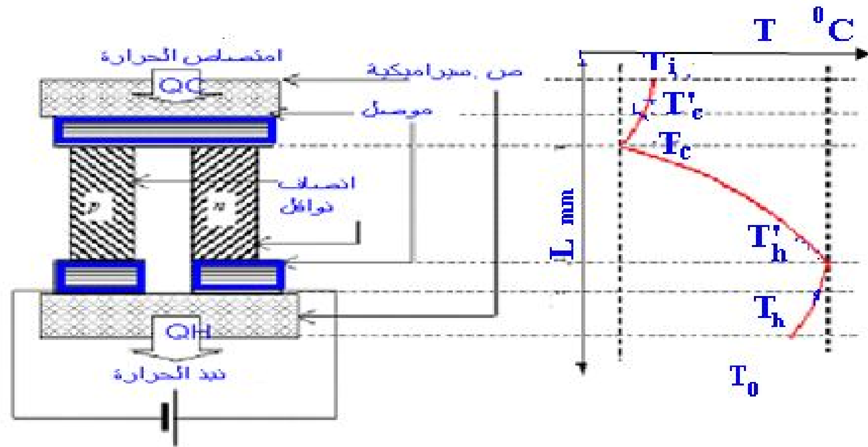
2- 9- 4- المواد الحراريّة البينيّة Thermal Interface Materials:

هناك طريقتان معروفتان للصق المبــادلات (النوابــذ) الحراريّــة علــى الوحــدات الكهروحراريّة، هي **إمّا** باللحام المباشر للمبادل الحراري علــى الوحــدة الكهروحراريّــة وستكون له مقاومة حراريّة وكهربائيّة منخفضة، وفي هذه الحالة يجب الانتباه لتأثير إجهاد القص عند السطوح البينيّة، **أو** باستخدام مادة الشحم الحراري عنــد التماســات، وهاتــان الطريقتان تساعدان على انتقال الحرارة بين الــسطحين المتلامــسين وتخفــيض الفــارق الحراري بين السطحين، فينصح للسطوح التي تكون أصغر من $19\ mm^2$ استخدام اللحام بشكل زعنفي حيث أنّ الإجهاد الحراري يسبب التمدد للعناصر (الصفيحة الــسيراميكيّة) بشكل ليس كبيراً، بينما لسطوح أكبر من $19\ \ mm^2$ ينصح بالشحمة الحراريّة مع الضغط، وعادةً تلحم الجهة الساخنة للوحدة الكهروحراريّة مع نابذ الحرارة، بينما الجهــة البــاردة يلصق عليها بواسطة الشحم الحراري عنصر حراري متوضّع على الوحدة لنقل الحــرارة بشكل جيد، ويجب أن نأخذ بعين الاعتبار معامل التمدد الحراري للمواد المستخدمة.

2- 10- دراسة التغير الحراري عبر الوحدة الكهروحراريّة

Temperature Distribution Across Thermoelectric Module:

من خلال دراسة التوزع الحراري للهواء الخارجي إلى الهواء الداخلي خلال الوحــدة الكهروحراريّة والوصلتين الباردة والساخنة، نجد أنّ درجة الحرارة تتغير من T_c للوصلة الباردة إلى T_h للوصلة الساخنة، حيث تعمل حرارة مقاومة التلامس على زيــادة درجــة حرارة الوصلة الباردة من T_c إلى T'_C ومن T_h إلى T'_h للوصلة الساخنة، ومــن وجهــة نظر انتقال الحرارة، درجة حرارة الصفيحة النحاسيّة للوصلة الباردة T'_c يجب أن تكــون أقل من درجة حرارة الوسط المراد تبريده T_i (الوسط الداخلي)، درجة حرارة الصفيحة النحاسيّة للوصلة الساخنة T'_h يجب أن تكون أكبر من درجة حرارة الوسط الخارجي. كما هو موضّح في الشكل (2- 16).



الشكل (2- 16) يبين التوزع الحراري خلال الوحدة الكهروحراريّة.

2-11- مميزات المبرّدات الكهروحراريّة Advantages of The TE Coolers :

إنّ تقنية الكهروحراريّة لاقت انتشاراً في أجهزة التبريد المنزليّة، ومكيفات الهواء بسبب سهولة الحصول على السعة التبريديّة المطلوبة من الجهاز الكهروحراري، ومن أجل الحصول على تطبيقات خاصة يتم تطوير هذه التقنية بشكل مستمر- على الرغم من أنّ القياس الكبير للمبرّد الكهروحراري لا يفضل على الأقل في الوقت الحاضر(أي عند طلب سعات تبريديّة كبيرة تفقد المبرّدات الكهروحرارية مميزاتها)- للحصول على أداء أنظمة التبريد الانضغاطي، لكن القدرة على التعديل، الوثوقية، المرونة في السعة التبريديّة هي مميزات مهمّة في بعض التطبيقات، فعلى سبيل المثال التبريد الكهروحراري لاقى نجاحاً واسعاً من ناحية ضبط درجة الحرارة للأجهزة الميكروإلكترونيّة والضوئيّة، ومن بعض التطبيقات الجديدة المستخدمة:

- تبريد الأماكن الساخنة في الأجهزة الإلكترونيّة.
- أنظمة التبريد الكهروحراريّة – الانضغاطيّة الهجينة.
- الكهروحراريّة في المبادلات الحراريّة.

والمبرّدات الكهروحراريّة هي أجهزة في الحالة الصلبة، تتميز بعدد من المميزات:

- عدم وجود أجزاء متحرّكة، حيث أنّ الأجهزة الكهروحراريّة تعمل بدون أجزاء متحرّكة، هذا يعني وثوقية العمل وعدم وجود تكاليف للصيانة.
- تنوع القياسات والأوزان الخفيفة: أنظمة التبريد الكهروحراريّة هي أكثر صغراً من ناحية الأبعاد والأوزان من آلات التبريد الميكانيكيّة الأخرى، وفي الوقت نفسه يوجد كثير من أنواعها الملائمة للتطبيقات النوعيّة.

■ القدرة (Ability) على التبريد حتى درجة حرارة أقل من درجة الحرارة الخارجية: من المعروف أنّ درجة حرارة النابذ (ماص الحرارة Heat sink) الحراري بالضرورة تزداد تبعاً لدرجة حرارة الوسط الخارجي، في المبرّدات الكهروحراريّة المتصلة بنفس النابذ الحراري لها القدرة على تخفيض درجة حرارته لأقل من قيمة درجة حرارة الوسط المحيط به.

■ القدرة (Ability) على التبريد والتسخين بنفس الجهاز الواحد: المبرّدات الكهروحرارية تستطيع التبريد أوالتسخين وهذا يتعلق بقطبية الطاقة DC المطبقة.

■ القدرة على ضبط درجة الحرارة (التبريد) المطلوبة: باستخدام جهاز تحكّم لمراقبة التغير في درجات الحرارة في الدارة، ومنه المبرّدات الكهروحراريّة تملك الإمكانية لضبط الحرارة بدقة تصل لـ ($\pm 0.01\,^{0}C$).

■ الوثوقيّة العالية (High Reliability): المبرّدات الكهروحراريّة تعمل بوثوقية عالية وهذه تتعلق بشروط التطبيق مع عمر زمني تشغيلي طويل حوالي 23 عاماً.

■ عدم وجود ضجيج كهربائيّ أوميكانيكي(No Electrical and Mechanical Noise): أيّ هي أجهزة ذات عمل هادىء.

■ العمل ضمن أيّ توجيه (Operates in any Orientation): المبرّدات الكهروحراريّة يمكن استخدامها في أيّ توجيه حتى في بيئات منعدمة الجاذبية (Zero Gravity Environments) ويمكن استخدامها في التطبيقات الفضائية.

■ مناسبة لمنابع التزويد الطاقي (Convenient Power Supply): الوحدات الكهروحراريّة هي تتغذى بمنابع DC ويمكنها العمل تحت مجال واسع من الكمون الداخل والتيار المطبق.

■ التبريد النوعي (Spot Cooling): بسبب فعاليّة العناصر الكهروحراريّة (أوالأزواج الحرارية) يمكنها تبريد عنصر نوعي واحد أو منطقة صغيرة، وتسمى أحياناً بالنقاط الساخنة (Hot Spot).

■ صديقة للبيئة (Environmentally Friendly): أنظمة التبريد التقليدية التي تستخدم الوسائط التبريديّة الكيميائيّة (Chemicals as Refrigerants) والغازات الضارة (Chlorofluorocarbons) بينما التبريد الكهروحراري لا يحوي أيّ وسيط تبريد ضار.

■ مرونة عالية (High flexibility): رغم انخفاض قيمة معامل الأداء الأعظمي للمبرّدات الكهروحراريّة، فإنّه لا يتأثر كثيراً إذا تغيرت شروط العمل (الحمل الحراري).

2- 12- مساوئ المبرّدات الكهروحراريّة Disadvantages of The TE Coolers:

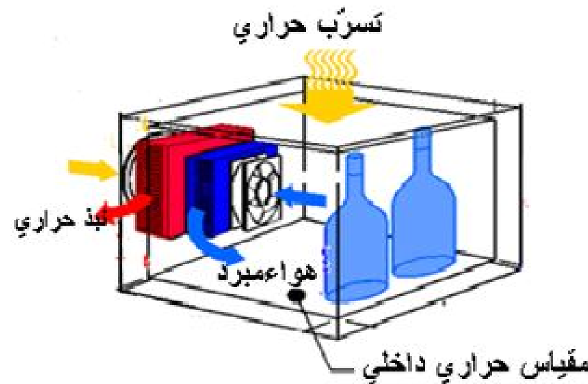
إنّ استخدام التبريد الكهروحراري يكون في تطبيقات محدودة { مثلاً التطبيق− الشكل (2-17)}، وقد يعود ذلك لانخفاض COP مقارنة مع أنظمة التبريد الانضغاطيّة الأخـرى، إنّ فعاليّة أجهزة التبريد (معامل الأداء) على الأغلب تقاس نسبة لفعاليّـة دارة كـارنو، دارة كارنو التي تملك أكبر قيمة لمعامل أداء (فعالية) ممكنة للاستفادة من كميـة العمـل المقدم للدارة لغاية التبريد والتي تعطى بالشكل:

$$COP = \frac{T_C}{T_h - T_C} \qquad (2\text{-}10)$$

حيث درجة حرارة المنبع الحراري والنابذ الحراري على التوالي T_h , T_c.

أجهزة التبريد الكهروحراريّة الحاليّة فعاليتها حوالي % 20 من فعاليّـة دارة كـارنو [18]، في المقابل المبرّدات المنزلية (التي تعمل بدارة انضغاطية، يـزداد فيهـا معامـل الأداء كلما كبر قياسها) تعمل بحوالي % 30 من فعاليّة دارة كـارنو، كمـا أنّ مكيفـات الهواء الكبيرة للمباني الضخمة تملك فعاليّة حوالي % 90 من فعاليّة كارنو.

اعتماداً على المواد الكهروحراريّة المتوفرة وتصاميم أجهزة التبريد الكهروحـراري، فإنّ المبرّدات الكهروحراريّة تفقد مميزاتها عند أحمال التبريد الكبيرة، وفيما يتعلق بمعامل الأداء فالأجهزة الكهروحراريّة فهو جيد للسعات الصغيرة فقط، ومـن مـساوئها التكلفـة العالية نسبة لواحدة الخرج ، وغلاء ثمنها وثمن تجهيزات النوابذ الحراريّة ومنابع القـدرة واستهلاكها الطاقي (من الكهرباء) الكبير وهو حوالي ضعف اسـتهلاك دارة انـضغاطية بنفس شروط العمل، فمن ناحية الجدوى الاقتصادية يعتبر التبريد الكهروحراري ذو تكلفـة عالية لإنتاج واحدة الخرج، وغير مفضل في السعات التبريديّة العالية، لكنه فعّال جداً فـي حالة سعات تبريديّة أقل من W 200.



الشكل (2- 17) يبين مبرّد كهروحراري مستخدم لحجرة تبريد صغيرة.

الفصل الثّالث

حسابات النظام الكهروحراري النظري

Calculations of Theoretical Thermoelectric System

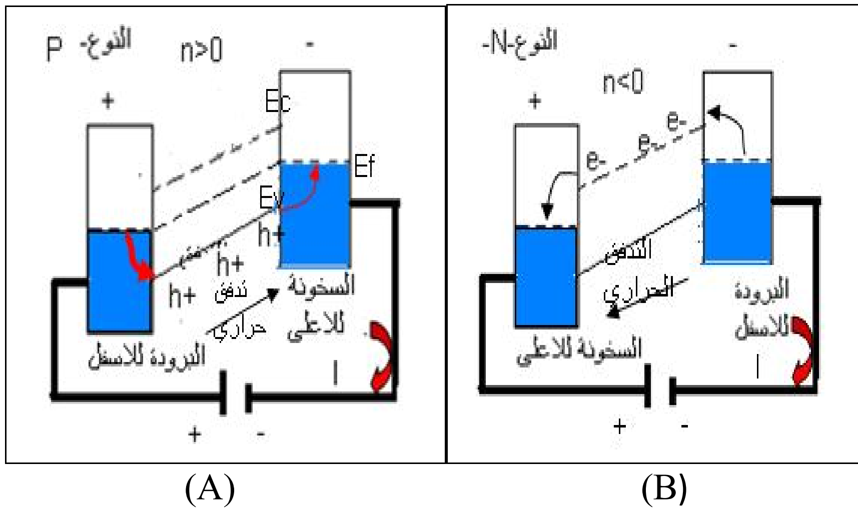
3-1- مقدمة Introduction:

التبريد الكهروحراري هو تحويل مباشر للطاقة الكهربائيّة إلـــى طاقـــة حراريّـــة، والتأثيرات المتعلقة بهذا الأمر هي تأثير بيلتيه وتأثير طومسون وتأثير سيبك (تأثير بيلتيه هو التأثير المعاكس لتأثير سيبك)، إضافة لحرارة جول وحرارة التوصيل [20].

يجب أولاً أن نبيّن الاختلاف بين حرارة جول التي تعطى بالعلاقـــة ($Q_j = I^2. R$)، تتناسب الحرارة هنا مع مربع قيمة التيار المار، بينما حرارة بيلتيه Q_π تتغير خطيّـــاً مـــع تغير التيار ($Q_\pi = \pi.q$)، حيث q الشحنة المارة عبر الدّارة ($q = I.T$)، و π يمثّل معامل بيلتيه (Peltier Coefficient) الذي يتعلق بطبيعة المواد المتصلة ودرجة حرارة التلامس.

3 -2- التأثيرات الكهروحراريّة Thermoelectric Effect:

3 -2 -1- تأثير بيلتيه Peltier Effect 1834:



(A) (B)

الشكل (3 - 1) يبين اتجاه التدفق الحراري في أنصاف النواقل حسب نوع المادة.

بعد اكتشاف مبدأ سيبك بحوالي 13 سنة، وجد العالم بيلتيه أنّه عند عكـــس ظـــاهرة العالم سيبك، أيّ بتمرير تيار كهربـــائي خـــلال دارة ازدواج حراريّـــة (Thermocouple) مشكلة من معدنين مختلفين ستبرد إحدى الوصلتين ويمكنها امتصاص حرارة من الوســـط المحيط بها بينما تسخن الوصلة الثانية ويمكنها نبذ حرارة إلى الوسط المحيط بها، يُظهـــر الشكل (3- 1) أنصاف النواقل من النـــوعين (N-type , P-type)، الـــشكل (A-1-3) يمثـــل

نصف ناقل من النوع (N-type) هنا (حاملات الشحنة الـسالبة الرئيـسيّة الإلكترونـات) والموضوع بين قطعتين معدنيتين، فعند وصل هاتين القطعتين إلى منبع جهـد كهربـائي مستمر ستتدفق الإلكترونات من الجهة اليمنى إلى الجهة اليسرى حاملةً معها الحرارة مـن الجهة اليمنى إلى الجهة اليسرى لنصف الناقل بحيث تكون جهة الإلكترونات عكس جهـة التيار الكهربائي، بينما في نصف الناقل من النوع (P-type) تكون هنا حاملات الشحنة هي الثقوب والتي تتدفق من الجهة اليسرى إلى الجهة اليمنى حاملةً معها الحرارة مـن الجهـة اليسرى إلى الجهة اليمنى لنصف الناقل مع اتجاه التيار الكهربائي.

يتم امتصاص حرارة أو نبذ حرارة نتيجة اختلاف القـوى المحركـة الكهربائيّـة $E_{PN} = E_P - E_N$ للمادة السالبة والمادة الموجبة على التوالي عنـد الوصـلات، تقاس القوة المحرّكة الكهربائية بالفولط (V) ، وهي تتعلق بفرق الكمـون المحـدث فـي الدّارة بالعلاقة $E_{PN} = V_{PN}$ وذلك عند إهمال المقاومة الداخلية للمنبع الكهربائي(r_0) ، نميّز هذا التأثير بمعامل بيلتيه π والذي تعطى معادلته بالعلاقة التالية:

$$\pi = (\alpha_P - \alpha_N).T \qquad (3\text{-}1)$$

وحيث أنّ T درجة الحرارة المطلقة للوصلة الباردة أو الساخنة، (α_N ,α_p) هما معامل سيبك للمادتين الموجبة والسالبة على التوالي، أي توجد قيمتان لمعامل بيلتيه ،الأولى تنتج عند حساب حرارة بيلتيه للوصلة الباردة ، والثانية تحسب للوصلة الساخنة بعد تعويض درجة حرارة كل وصلة على حدة، أي (T_c للوصلة للباردة و T_h للوصلة للساخنة).

وتعرّف الحرارة الممتصة (المنبوذة) بحرارة بيلتيه وتحسب من خلال العلاقة التالية:

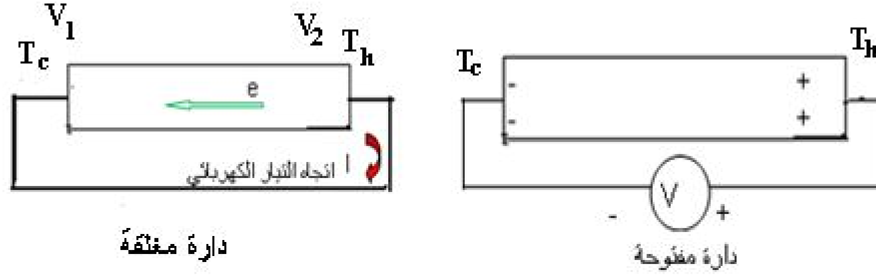
$$Q_{\pi} = \pi.I \qquad (3\text{-}2)$$

وحيث: I - شدة التيار الكهربائي الثابت، π - معامل بيلتيه.

3- 2- 2- تأثير سيبك Seebeck Effect 1821:

وجد العالم الأستوني توماس سيبك أنّه بالإمكان توليد قوة دفـع محرّكـة كهربائيّـة (emf- **E**lectro**m**otive **F**orce) في دارة الازدواج الحـراري المـشكّلة مـن سـلكين معدنيين مختلفين عندما تكون النهايتين عند درجتي حرارة مختلفتين، ففـي دارة مفتوحـة تحوي قضيباً معدنياً عرض لحرارة عند أحد أطرافه سيصبح هذا الطرف سـاخناً بينمـا الطرف الأخر سيبرد، عندئذ الإلكترونات الحرّة في المعدن تتصرف كـذرّات الغـاز، أي الإلكترونات الحرّة في الطرف الساخن ستمتلك طاقة حركيّة تجبرها على التحرك بـسرعة

عالية إلى الطرف البارد (الآخر) من القضيب المعدني ونتيجة لهذه السرعة الكبيرة تنتشر الإلكترونات وسيكون لدنيا مجرى لتدفق الإلكترونات من الطرف الساخن إلـــى الطـــرف البارد للقضيب، ولتتكدس الشحنات السالبة على الطرف البارد تمنع الشحنات فيما بعد من التراكم، الشكل (3- 2).



الشكل (3- 2) يبين تكوّن ظاهرة سيبك عند وضع المادة في فرق درجات حرارة.

ولكن في دارة مغلقة ونتيجة تراكم الشحنات وبهدف إنقاصها ســيتدفق التيـــار فـــي الدارة ويستمر طالما هنالك فرق في درجات الحرارة بين نهايتي القضيب المعدني وهـــذا يسمى (مبدأ سيبك) وهو المستخدم لإنتاج مولّدات كهروحراريّة، وتعرّف القوة المحرّكـــة الكهربائيّة وفق معادلة معامل سيبك والذي يقاس بواحدة (V/K) وأحياناً بـــ $(V/{}^0C)$:

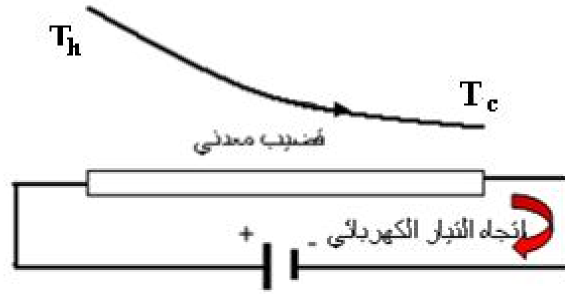
$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad \text{معامل سيبك} \quad \Delta V = V_2 - V_1 \quad , \qquad (3-3)$$

بشكل عام إنّ فرق درجات الحرارة في الناقل يجعل الإلكترونات تتدفق من الجهـــة الساخنة إلى الجهة الباردة وذلك عند عدم مرور تيار كهربائي، أمّا في حالة وصل الـــدارة إلى منبع تيار مستمر يكون هنا اتجاه التيار عكس اتجاه حركة الإلكترونات حيث أنّ تدفق الإلكترونات ينتج قوة محرّكة كهربائيّة تتناسب مع الحرارة المقدمة، وتزداد القوة المحرّكة الكهربائيّة باستخدام المواد شبه الموصلة، ومعامل سيبك يأخذ قيمة موجبة (عندما حاملات الشحنة هي الثقوب) أو سالبة (عندما حاملات الشحنة الإلكترونات) ويدعى أحياناً بمعامـــل القوة المحرّكة الكهربائيّة الحراري.

3- 2- 3- تأثير طومسون Thomson Effect 1855:

عندما يمر تيار كهربائي ثابت عبر قضيب معدني نهايتيه عنـــد درجتـــي حـــرارة مختلفة سيتم امتصاص حرارة أو نبذ حرارة خلال النهايتين، إضافة لحرارة جول الناتجـــة عن المقاومة الكهربائيّة للقضيب.

أيّ عندما تتدفق الحاملات الكهربائيّة من النهاية الباردة إلى النهاية الساخنة يتوجب امتصاص حرارة للحفاظ على التوازن في درجة الحرارة، وعند تدفق حاملات الشحنة الكهربائيّة من النهاية الساخنة إلى النهاية الباردة سيتم طرح حرارة للحفاظ على التوازن في درجة الحرارة كما يرى في الشكل (3- 3). ويمكن تطبيق تأثير طومسون على المادة بشكل خارجي بتغيير نوع المادة على طول الناقل مما يحسن أداء التبريد مقارنة مع المادة العادية ذات الخواص الواحدة.



الشكل (3- 3) يبين تأثير طومسون في القضيب.

يمكن أنّ نعرّف الحرارة الممتصة أو المنبوذة بحرارة طومسون وهي العمل المبذول ضد فرق الجهد الانتشاري في طول القضيب، معادلة حرارة طومسون:

$$Q_\tau = \int \tau . I . dT \qquad (3 - 4)$$

وحيث τ معامل طومسون والذي يقاس بـ (W/ K.A) أو (V/ K) ومعادلته:

$$\tau = \tau_p - \tau_N \qquad (3 -5)$$

ويرتبط معامل طومسون مع معامل بيلتيه π ومعامل سيبك α بالعلاقة التالية:

$$\frac{d}{dT}(\pi_{P,N}) + \tau_N - \tau_p = \alpha_p - \alpha_N \qquad (3 - 6)$$

حيث N يرمز للمادة السالبة و P للمادة الموجبة.

3- 3- معادلات الطاقة للنظام الكهروحراري

Energy Equations for Thermoelectric System:

نعتبر أنّ خواص المواد شبه الموصلة (α ، k ، ρ) ذات قيمة ثابتة خلال المدى الفعّال لدرجة الحرارة (حيث أنّ مدى تغير درجة الحرارة لاستخدامات التبريد صغير)، بشكل عام معادلات الطاقة للنظام الموضّح بالشكل (3- 4) هي:

1- حرارة بيلتيه Peltier Heat:

عبارة عن الحرارة المنتقلة خلال الوصلة نتيجة اختلاف القوى المحرّكة الكهربائيّـة ودرجة حرارة الوصلة، وتعطى للوصلة الباردة:

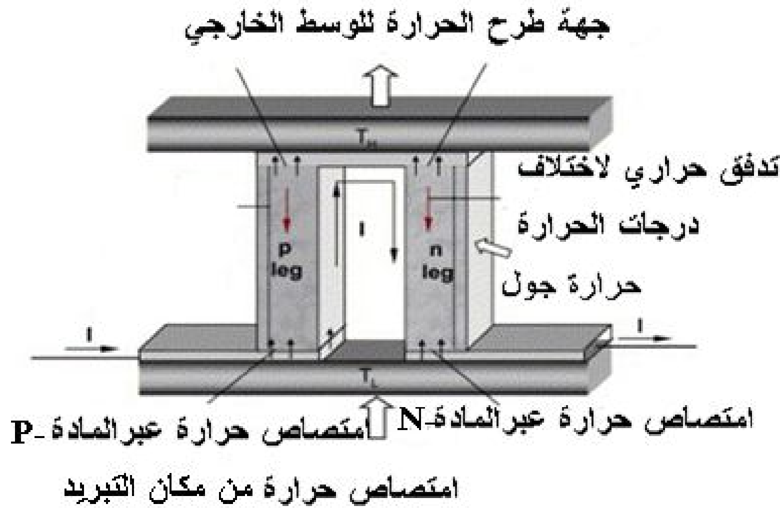
$$Q_{\pi.C} = \alpha_{p,N}.I.T_c \qquad (3\text{- }7)$$

وتعطى بالنسبة للوصلة الساخنة:

$$Q_{\pi.h} = \alpha_{p,N}.I.T_h \qquad (3\text{- }8)$$

باعتبار $\alpha_{P,N}$ عبارة عن فرق معامل سيبك للمادتين المشكلتين للوصلة ومعادلتها:

$$\alpha_{p,N} = \alpha_P - \alpha_N \qquad (3\text{- }9)$$



الشكل (3- 4) يبين التأثيرات الحراريّة على الزوج الكهروحراري الواحد.

2- حرارة طومسون Thomson Heat:

عبارة عن الحرارة الناشئة عن سريان التيار الكهربائي الثابت خلال العنصر الذي نهايتاه عند درجتي حرارة مختلفة وتعطى بالعلاقة:

$$Q_{\tau} = \tau_{p,N}.I.(T_h - T_c) \qquad (3\text{ -}10)$$

وحيث أنّ $\tau_{P,N}$ فرق معامل طومسون ومعادلته:

$$\tau_{p,N} = \tau_P - \tau_N \qquad (3\text{ -}11)$$

3- القدرة اللازمة Power Required:

القدرة اللازمة للبطارية عبارة عن القدرة اللازمة للتغلب على مقاومة المادة السالبة N والمادة الموجبة P والوصلات والأسلاك وتعطى بالعلاقة:

$$W = \alpha_{p,N}.I.(T_h - T_C) \quad (3-12)$$

4- حرارة التوصيل Conduction Heat:

عبارة عن الحرارة المنتقلة من الوصلة الساخنة إلى الوصلة البـــاردة نتيجـــة فـــرق درجات الحرارة خلال العناصر الموجبة والسالبة وتعطى بالمعادلة:

$$Q_K = k_{p,N}.(T_h - T_C) \quad (3-13)$$

وحيث أنّ $k_{P,N}$ عبارة عن موصليّة الزوج الكهروحراري ومعادلتها:

$$k_{P,N} = (k_P + k_N) = \frac{A}{L}.(k_P + k_N) \quad (3-14)$$

حيث: L– ارتفاع العنصر وغالباً ارتفاع العنصر السالب مساوٍ لارتفـــاع العنـــصر الموجب وكذلك تساوي مساحة المقطع الدائري أو المستطيل للعنصرين A.

5- حرارة جول Joule Heat:

وهي الحرارة الناشئة عن مرور تيار كهربائي خلال العنصر الحراري ومعادلتها:

$$Q_j = I^2.R \quad (3-15)$$

R تمثل مقاومة العنصر الحراري وتعيّن بـــ ($R = \rho.\frac{L}{A}$)

ومعادلة جول للزوج الكهروحراري تعطى بالعلاقة:

$$Q_j = I^2.R_{P,N} \quad (3-16)$$

وحيث أنّ معادلة المقاومة للزوج الكهروحراري هي :

$$R_{P,N} = R_P + R_N \quad (3-17)$$

6- حرارة مقاومة التلامس Heat of Contact Resistance:

عبارة عن الحرارة الناشئة عن مرور التيار الكهربائي في الوصـــلة التـــي تـــربط العناصر الموجبة P مع العناصر السالبة N ومادة لحام ألواح النحاس بالعناصـــر الـــسالبة والموجبة، ومعادلة حرارة التلامس للوصلة الباردة هي:

$$Q_{C,R} = I^2.R_{c,R} \quad (3-18)$$

وحيث أنّ:

$$R_{C,R} = R_S + R_{C,P} \quad (3-19)$$

وإنّ R_S- مقاومة لحام الوصلة $R_{c,p}$- مقاومة لوح النحاس.

ويمكن أن تعطى معادلة حرارة التلامس على الشكل التالي:

$$Q_{C,R} = f.I^2.R_{p,N} \quad (3\text{-}20)$$

حيث أنّ f عبارة عن معامل مقاومة التلامس ومعادلته:

$$f = (R_S + R_{C,P})/R_{P,N} \quad (3\text{-}21)$$

3- 4- حسابات النظام الكهروحراري النظري

Calculations of Theoretical Thermoelectric System:

أثناء تحليل النظام الكهروحراري { الشكل (3- 5) }، نهمل تأثير كل مــن حــرارة طومسون (لصغرمعامل طومسون فهو من مرتبة 6.7×10^{-5} V/K مثلاً) وحرارة مقاومة التلامس وتأثير درجة الحرارة على الخواص (α , ρ , k) وفرض أنّ نصف حرارة جول تصل للوصلة الباردة فإنّ معادلة التوازن الحراري للوصلة الباردة :

$$Q_c = Q_{\pi,c} - \frac{1}{2}Q_j - Q_K \quad (3\text{-}22)$$

وحيث Q_c هي حمل التبريد للزوج الكهروحراري الواحد وبالتعويض بقيم التدفقات الحراريّة نجد:

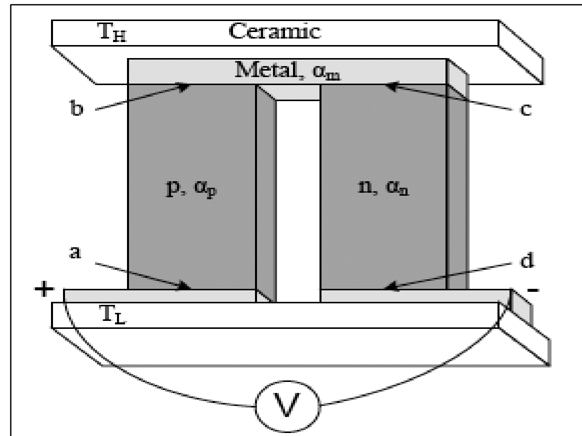
$$Q_c = \alpha_{P,N}.I.T_c - \frac{1}{2}I^2.R_{P,N} - k_{P,N}.(T_h - T_c) \quad (3\text{-}23)$$

وتكون للوصلة الساخنة مع فرض أنّ نصف حرارة جول تصل للوصلة الساخنة:

$$Q_h = Q_{\pi,h} + \frac{1}{2}Q_j - Q_K \quad (3\text{-}24)$$

حيث Q_h الحرارة المطرودة من قبل الزوج الكهروحراري الواحد وبالتعويض بقيم التدفقات الحراريّة:

$$Q_h = \alpha_{P,N}.I.T_h + \frac{1}{2}I^2.R_{P,N} - k_{P,N}(T_h - T_c) \quad (3\text{-}25)$$



الشكل (3- 5) يمثل مكوّنات الزوج الكهروحراري.

ولكن معادلة العمل اللازم للبطارية هي:

$$W = Q_h - Q_c \qquad (3\text{-}26)$$

وبالتعويض نجد:

$$Q_h = \alpha_{P,N}.I.(T_h - T_c) + I^2.R_{P,N} \qquad (3\text{-}27)$$

ومنه معادلة معامل الأداء للنظام الكهروحراري:

$$COP = \frac{Q_C}{W} \qquad (3\text{-}28)$$

سنقوم بدراسة بعض الحالات الخاصة وإعطاء الحلول الرياضيّة لها وهي:

3- 4 - 1- حالة أقصى حمل تبريد Case of Maximum Cooling Load:

قد يكون المطلوب أحياناً الحصول على أقصى حمل تبريد Q_c ونحن نعلم أنّ ذلك يتوقف على شدة التيار I لذلك نفاضل المعادلة بالنسبة للتيار ونساوي بالصفر:

$$\frac{dQ_C}{dI} = 0 \qquad (3\text{-}29)$$

وتشير النتائج لشدة التيار الأمثل:

$$I_{OPT} = (\frac{\alpha_{P,N}}{R_{P,N}}).T_C \qquad (3\text{-}30)$$

ونعوض في المعادلة Q_c بقيمة التيار السابقة نجد:

$$Q_{c,MAX} = (\frac{\alpha^2_{P,N}}{R_{P,N}})[\frac{1}{2}T_C^2 - \frac{1}{Z}\ (T_h - T_c)] \qquad (3\text{-}31)$$

(أقصى حمل تبريد للزوج الكهروحراري الواحد)

ويكون العمل اللازم للزوج الكهروحراري الواحد:

$$W = \left(\frac{\alpha_{P,N}}{R_{P,N}}\right).T_C.T_h \qquad (3\text{-}32)$$

ومنه معامل الأداء للنظام:

$$COP = \left(\frac{1}{2T_h}\right)\left[T_C - \frac{2}{Z.T_C}(T_h - T_c)\right] \qquad (3\text{-}33)$$

وحيث أنّ Z هي مميزة الشكل للزوج الكهروحراري وأحياناً يسمى بمعامل الاستحقاق ومعادلته:

$$Z = \left(\frac{\alpha^2_{P,N}}{R_{P,N}.K_{P,N}}\right) \qquad (3\text{-}34)$$

وهنا نستنتج أنّه عندما تؤول قيمة Z إلى مالا نهاية تؤول قيمة COP إلـــى القيمـــة التالية ($T_c / 2.T_h$) ولدنيا T_h أكبر من T_c فتصبح قيمة معامل الأداء ($T_c / 2.T_h$) أقــل من الواحد الصحيح ولذلك لا يوصى باستخدامه إلا للضرورة.

3- 4 -2- حالة أقصى معامل أداء Case of Maximum COP:

في هذه الحالة يطلب الحصول على أقل عمل لازم للحصول على حمل تبريد معين وهنا نفاضل معادلة معامل الأداء للنظام بالنسبة للتيار ونساوي بالصفر:

$$\frac{d(cop)}{dI} = 0 \qquad (3\text{-}35)$$

لنجد نتائج التحليل الرياضي التي تعطي علاقة شدة التيار الأمثل:

$$I_{OPT} = \left(\frac{\alpha_{P,N}}{R_{P,N}}\right).\left[(T_h - T_c)/(M-1)\right] \qquad (3\text{-}36)$$

وحيث أنّ:

$$M = \sqrt{1 + 0.5.Z.(T_h - T_C)} = 1.23 \qquad (3\text{-}37)$$

ويكون العمل اللازم للزوج الكهروحراري الواحد:

$$W = \left(\frac{\alpha^2_{P,N}}{R_{P,N}}\right)[M(T_h - T_c)^2/(M-1)^2] \qquad (3\text{-}38)$$

وتصبح معادلة معامل الأداء:

$$COP = \left(\frac{T_C}{T_h - T_C}\right)\left[(M - \frac{T_h}{T_C})/(M+1)\right] \qquad (3\text{-}39)$$

ومنه علاقة حمل التبريد للزوج الكهروحراري الواحد:

$$Q_C = \left(\frac{\alpha^2_{P,N}}{R_{P,N}}\right)\left[\frac{M(T_h - T_C)(MT_h - T_C)}{(M+1)(M-1)^2}\right] \qquad (3\text{-}40)$$

3- 4 - 3 - حالة خاصة Special Case:

عند إهمال تأثير كل من حرارة جول Q_j وحرارة التوصيل Q_k يبقى فقــط تــأثير حرارة بيلتيه Q_π تصبح العلاقات كالتالي:

للوصلة الباردة:

$$Q_{\pi.C} = \alpha_{p,N}.I.T_c \qquad (3\text{-}41)$$

للوصلة الساخنة:

$$Q_{\pi h} = \alpha_{p,N}.I.T_h \qquad (3\text{-}42)$$

ويكون العمل اللازم في الزوج الكهروحراري الواحد:

$$W = \alpha_{p,N}.I(T_h - T_C) \quad (3\text{-}43)$$

هنا تصبح علاقة معامل الأداء لنظام التبريد الكهروحراري:

$$COP = \frac{Q_C}{W} = (\frac{T_C}{T_h - T_C}) \quad (3\text{-}44)$$

وهو الشكل المشابه لمعامل دارة كارنو المعكوسة والتي تعمل بين نفس درجتي الحرارة ($T_h - T_c$).

3- 5 - اختبار الأداء للنظام الكهروحراري

Performance Test for Thermoelectric System:

الاختبارات التي تقيس أداء النظام الكهروحراري تحتاج لعنصر متصل مع النظام العامل وميزان قياس معياري لضمان نوعية وتماسك وانسجام مكونات النظام الكهروحراري، وسنقدم هنا فكرة مبسطة عن الاختبارات التي تقيس مكونات النظام الكهروحراري [10].

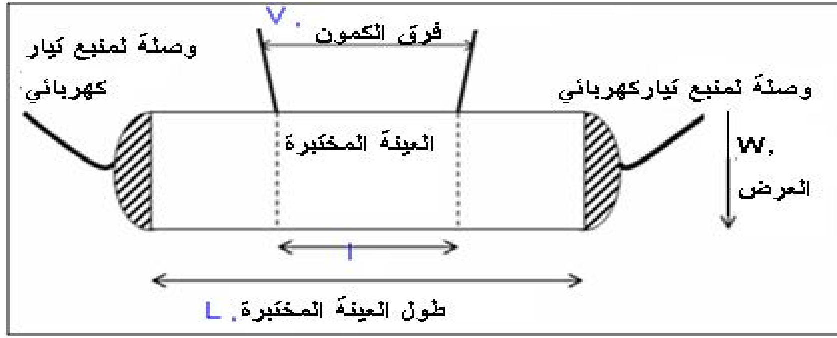
3- 5-1- قياس خصائص المواد الكهروحراريّة

Measurement of Properties of Thermoelectric Materials:

نميّز أداء المواد الكهروحراريّة عبر قيمة معامل مميزة الشكل (رقم الاستحقاق):

$$Z = \frac{\alpha^2}{R.k} \quad (3\text{-} 45)$$

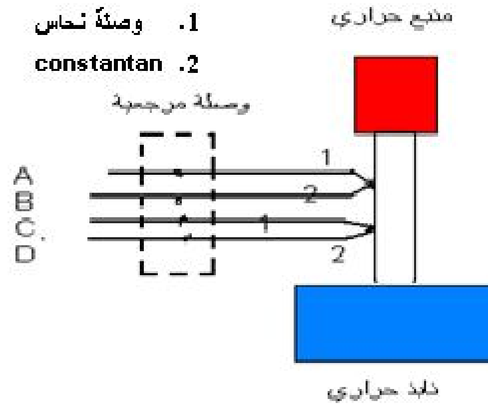
حيث يبدو من خلال العلاقة أنّها متعلقة بمعامل سيبك والإيصاليّة الكهربائية والإيصاليّة الحراريّة وقياس الخصائص الكهروحراريّة تضمن أنّ المواد الكهروحرارية المستخدمة في الجهاز منسجمة فيما بينها كهربائيّاً وحراريّاً عند التركيب، وفي هذا الاختبار الإيصاليّة الكهربائية للمواد الكهروحراريّة تقاس عمليّاً عبر أربع تماسات مع النظام (العيّنة المختبرة) كما في الشكل (3- 6)، في هذا الاختبار التيار الكهربائي AC يطبق على العينة عبر تماسات ملحومة عند نهايتي العينة، إنّ اختلاف الكمون الكهربائي سيقاس عبر المسبارين الآخرين اللذين يلصقان بشكل رقيق بالضغط أو باللحام، إنّ منبع التيار AC يستخدم عملياً لقياس الإيصاليّة الكهربائيّة لتجنب التأثير الجانبي لكمون سيبك.



الشكل (3 - 6) يبين كيفية قياس الإيصاليّة الكهربائيّة لعيّنة مادة كهروحراريّة.

أمّا عن الخطوات التجريبيّة لقياس قيمة معامل سيبك فنراها في الشكل (3-7) في هذا القياس فرق الكمون بين (V_{AB} و V_{CD}) يستخدم لتحديد الفارق الحراري، و V_{AC} أو V_{BD} هو قياس كمون سيبك، ويقاس معامل سيبك عادةً يتحدد بتغيّر التدرج الحراري:

$$\alpha = \frac{d(\Delta V_{AC})}{d(\Delta T)} \quad (3\text{- }46)$$

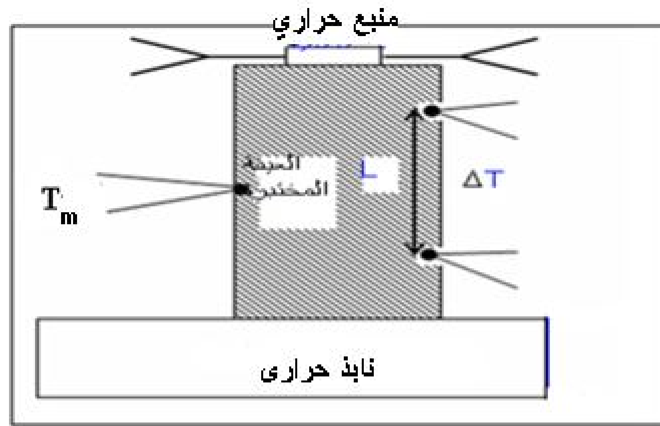


الشكل (3-7) يبين كيفية قياس معامل سيبك لعيّنة كهروحراريّة (مركب من النحاس والنيكل-constantan).

أمّا لقياس الإيصاليّة الحراريّة للمواد الكهروحرارية فيلاقى صعوبات في القياس بسبب إيصاليتها المنخفضة والضياعات الحراريّة المحتملة والترتيب المطلوب لقياسها يشاهد من خلال الشكل (3- 8)، حيث إحدى نهايات العينة تكون في تماس جيد مع ماص الحرارة (منبع حراري) بواسطة استخدام شحمة حراري (مادة رابطة بينية) أو باستخدام مادة الأبوكسي ومسخن صغير يلتصق بالنهاية الحرة للعينة، في هذه الحالة تعطى الإيصاليّة الحراريّة بالعلاقة التالية:

$$k = \frac{Q.L}{A.\Delta T} \quad (3\text{ -}47)$$

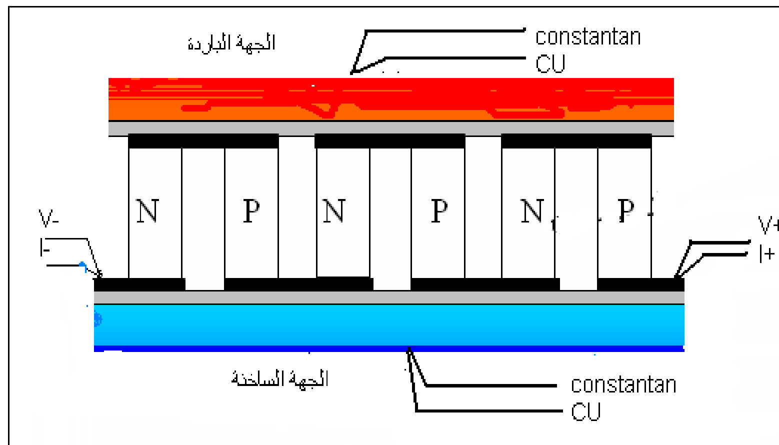
وحيث أنّ Q الطاقة الكهربائيّة للمسخن.



الشكل (3- 8) يبين كيفية قياس الإيصاليّة الحراريّة لمادة كهروحراريّة (عيّنة).

3- 5- 2- اختبار أداء الوحدات الكهروحراريّة:

العوامل الرئيسية التي تميز الأجهزة الكهروحراريّة هي($\Delta T_{max}, V_{max}, I_{max}, Q_{max}$) وعلى أساسها يقيّم معامل الأداء للمركبة (الوحدة) الكهروحراريّة، مثلاً اختبار الأداء للمركبة الكهروحراريّة المعطى في الشكل (3- 9)، بعض الاختبارات يمكن أنّ تتعلق بشروط الحالة السيئة لواقعها الفعلي أو بمحاكاة الاستخدام المستقبلي لها لضمان أن تلاقي المركبة الكهروحراريّة مكانها المناسب في التطبيق.



الشكل (3- 9) يبين اختبار التشكيل للوحدة الكهروحراريّة.

الفصل الرّابع

المبرّدات الكهروحراريّة الثنائيّة الطبقات

The Two- Stage Thermoelectric Coolers

4-1- مقدمة Introduction:

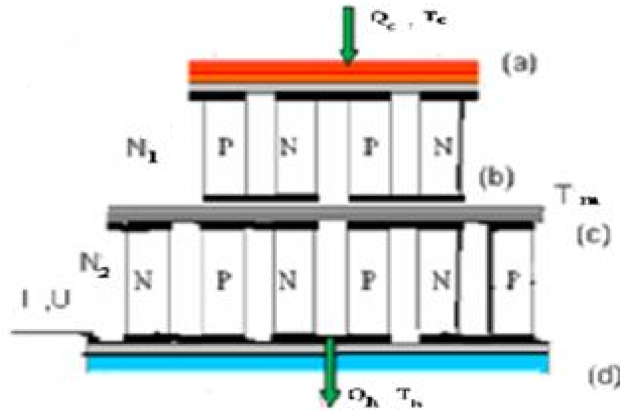
بسبب الأداء المحدود للمواد الكهروحراريّة المستخدمة في نظام التبريد الكهروحراري وتأثير ذلك على أداء المبرّد الكهروحراري، دعت ضرورات الاستخدام العملي بالتفكير في أنظمة التبريد المتعددة الطبقات كونها تلبي مطلب الحاجة لفارق حراري مرتفع، حيث أنّ هذه المبرّدات يمكنها أن تحدث فارقاً حرارياً كبيراً (بين جهتي المبرّد) عند معامل أداء مناسب، فمثلاً المبرّدات الثنائيّة يمكنها تحقيق فارق حراري يصل لحوالي 180 K، والعامل المتحكم بهذا الأمر هو عدد طبقات نظام التبريد وعدد الأزواج الكهروحراريّة في كلّ طبقة، فكل طبقة تعمل كماص حراري من الطبقة التي قبلها ونابذ حراري للتي تليها، والمبرّدات الكهروحراريّة ثنائيّة الطبقات تشكّل على الأغلب في تصميمين اثنين، التصميم الأول يأخذ فيه شكل الطبقات المتتالية الشكل الهرمي التقليدي (Conventional Pyramid-Styled Design)، فيه التيار الكهربائي المغذّي للدارة وحيد الاتجاه باتجاه الطبقة العليا وهي الطبقة الأبرد بينما السفلية طبقة النبذ الحراري، أمّا التصميم الثّاني فهو تصميم خاص بشكل متوازي مستطيلات (Special Cuboid–Styled)، حيث يكون التيار بشكل متعاقب (Alternated) وهنا الطبقة العلوية والسفلية يمكن أن تُوضع لتعمل بحالتي التبريد أوالتسخين من الجهتين، إنّ عدد وبنية الأزواج الكهروحراريّة لكل طبقة في التصميم الخاص الثّاني للمبرّد الكهروحراري متماثل في الترتيب لإحداث نفس الأداء عندما يمر التيار الكهربائي بشكل متعاقب، أمّا عدد الأزواج الكهروحراريّة في النظام الهرمي فهي عادة متناسبة بين الطبقتين بنسبة معينة [3].

تم إجراء دراسة تحليليّة للنظام الثنائي بشكل مفصل، ومن ثمّ استنتاج التصميم المثالي للمبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات بتصميميه، أي من ناحية السعة التبريديّة العظمى ومعامل الأداء COP المثالي، وإيجاد النسبة المثاليّة لعدد الأزواج الكهروحراريّة بين الطبقات (للنظام الهرمي) عندما يكون العدد الكلي لهذه الأزواج ثابتاً، بينما للتصميم الثّاني (متوازي المستطيلات) تمّ إيجاد النسبة المثلى للتيار الكهربائي المار في الطبقتين.

إننّا سنقبل بهذه الفرضيّات أثناء الدراسة:

- خصائص المواد الكهروحراريّة من النـــوعين (N-type و P-type) متماثلـــة عـــدا معامل سيبك المتعاكس القطبية (الإشارة).
- الخصائص الكهروحراريّة للعناصر الحراريّة تتعلـــق بدرجـــة الحـــرارة وســـتدلّ بدرجة الحرارة المتوسطة للمبرّدات الكهروحراريّة.
- إهمال أي مقاومة تلامس، متضمنة المقاومة الحراريّة (للتلامس) بين الطبقتين.
- تجاهل أي انتقال حراري بين المبرّد الكهروحراري والوســـط الخـــارجي ماعـــدا التبادل عبر النهاية الباردة والنبذ الحراري عبر النهاية الساخنة.

4 -2- المبرّد الكهروحراري ذو التصميم الهرمي Pyramid-Styled TEC :



الشكل (4 -1) يبين المبرّد الكهروحراري الثنائي ذو التصميم الهرمي.

الشكل (4- 1) يظهر المبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات ذو الـــشكل الهرمـــي وهنا نشير للعدد الكلي للأزواج الكهروحراريّة بالرمز N_0 وسيفرض ثابتـــاً، وبفـــرض أنّ نسبة عدد الأزواج الكهروحراريّة بين الطبقتين الثانية (السفلية) والأولى العلويـــة هـــي $(X = N_2/ N_1)$، فعدد الأزواج للطبقة الأولى والثانية يمكن أن نعبّر عنه بـــ{ $N_0 /(X+1)$ } و { $N_0.X /(X+1)$ } على التوالي، وبكتابة معادلات التوازن الحراري لكل وصلة بدأً مـــن (a) وانتهاءً بـــ (d):

$$Q_{C1} = \left[\alpha.I.T_C - \frac{1}{2} I^2.R - k.(T_m - T_C) \right] . \frac{N_0}{X+1} \quad (4\text{-}1)$$

$$Q_{h1} = \left[\alpha.I.T_m + \frac{1}{2} I^2 R - k.(T_m - T_C) \right] . \frac{N_0}{X+1} \quad (4\text{-}2)$$

$$Q_{C2} = \left[\alpha.I.T_m - \frac{1}{2} I^2.R - k.(T_h - T_m) \right] . \frac{N_0.X}{X+1} \quad (4\text{-}3)$$

$$Q_{h2} = \left[\alpha.I.T_h + \frac{1}{2} I^2.R - k.(T_h - T_m) \right] . \frac{N_0.X}{X+1} \quad (4\text{-}4)$$

حيث أنّ (k، R، α) هما معامل سيبك (Seebeck Coefficient) والمقاومة الكهربائيّة والناقليّة الحراريّة (Thermal Conductance) للزوج الكهروحراري على التوالي، ويحسب كلٌّ معامل من معادلته الخاصة كالتالي:

$$R = \frac{2\rho}{G} \text{ ،} \quad k = 2k.G \text{ ،} \quad \alpha = \left| \alpha_P - \alpha_N \right| \qquad (4\text{-}5)$$

حيث أنّ (k ، ρ) هما المقاومة الكهربائيّة النوعيّة (Electrical Resistivity) والإيصاليّة الحراريّة (Thermal Conductivity) للمواد الكهروحراريّة على التوالي، نعرّف معاملاً جديداً يسمّى معامل البناء للعنصر الحراري (The Structural Parameter):

$$G = A / L \qquad (4\text{-}6)$$

حيث أنّ A وL هما مساحة مقطع وطول العنصر الكهروحراري على التوالي، عندما نقسم جهتي معادلات التوازن الحراري على المقدار ($N_0.\ k.T_C$) ذوات الأرقام {(4و 3و 2و 1) – 4} سينتج لدنيا الأشكال اللابعدية التالي:

$$q_{c1} = \left[j - \frac{1}{2} j^2 . \frac{1}{Z.T_C} - (\Theta_m - 1) \right] . \frac{1}{X + 1} \qquad (4\text{-}7)$$

$$q_{h1} = \left[j.\Theta_m + \frac{1}{2} j^2 . \frac{1}{Z.T_C} - (\Theta_m - 1) \right] . \frac{1}{X + 1} \qquad (4\text{-}8)$$

$$q_{c2} = \left[j.\Theta_m - \frac{1}{2} j^2 . \frac{1}{Z.T_C} - (\Theta_h - \Theta_m) \right] . \frac{X}{X + 1} \qquad (4\text{-}9)$$

$$q_{h2} = \left[j.\Theta_h + \frac{1}{2} j^2 . \frac{1}{Z.T_C} - (\Theta_h - \Theta_m) \right] . \frac{X}{X + 1} \qquad (4\text{-}10)$$

وحيث المقادير اللابعدية تعرّف على التوالي:

$$q_i = \frac{Q_i}{N_0 k.T_C}, (i = c_1, c_2, h_1, h_2) \qquad (4\text{-}11)$$

$$j = \frac{I.\alpha}{k} \qquad (4\text{-}12)$$

$$\Theta_i = \frac{T_i}{T_c}, (i = m, h) \qquad (4\text{-}13)$$

ونعرّف كذلك المقدار التالي:

$$Z = \frac{\alpha^2}{R.k} \qquad (4\text{-}14)$$

بحساب Θ_m من مساواة المعادلتين ($q_{h1} = q_{c2}$) وتعويض قيمتها في المعادلة (7 - 4)،

وتعريف معامل أداء جديد ($\varphi = 1 + 1/COP$)، نستطيع استنتاج علاقة السعة التبريديّة اللابعديّة ومعامل الأداء الجديد (φ) للنظام الثنائي ذو التصميم الهرمي بالشكل التالي:

$$q_c = \left[j - \frac{1}{2}.j^2.\frac{1}{Z.T_C} + 1 - \frac{\frac{1}{2}.j^2.\frac{X+1}{Z.T_C} + X.\Theta_h + 1}{(X+1) + j.(X-1)} \right].\frac{1}{X+1} \quad (4\text{-}15)$$

$$\varphi = \frac{q_{h2}}{q_{c1}} = x\,\frac{j.\Theta_h + \frac{1}{2}.j^2.\frac{1}{Z.T_C} - \Theta_h + ((\frac{1}{2}.j^2.\frac{X+1}{Z.T_C} + X.\Theta_h + 1)/((X+1)+j(X-1)))}{j - \frac{1}{2}.j^2.\frac{1}{Z.T_C} + 1 - ((\frac{1}{2}.j^2.\frac{X+1}{Z.T_C} + X.\Theta_h + 1)/((X+1)+j.(X-1)))} \quad (4\text{-}16)$$

باستخدام المعادلتين السابقتين يمكن أن نرسم العلاقة بين ($COP \sim q_C$) للمبرّد الثنائي الهرمي عند فرض قيم مختلفة للمعامل X، نرى التمثيل البياني في الشكل (4- 2) علماً أنّ خصائص المواد الكهروحراريّة تحدد من خلال العلاقات التي حدّدتها الشركات العالمية المنتجة تجارياً [13] لهذه المواد ومنها الشركة الأمريكيّة (MELCOR) وهذه العلاقات:

1. لحساب معامل سيبك تعطى العلاقة اعتماداً على درجة الحرارة المتوسطة للمبرّد:

$$a = (22224 + 930.6T_m + 0.9905T_m^2).10^{-9} \quad (4\text{-}17)$$

2. لحساب المقاومة الكهربائيّة النوعيّة للمادة الكهروحراريّة:

$$\rho = (5112 + 163.4T_m + 0.6279T_m^2).10^{-10} \quad (4\text{-}18)$$

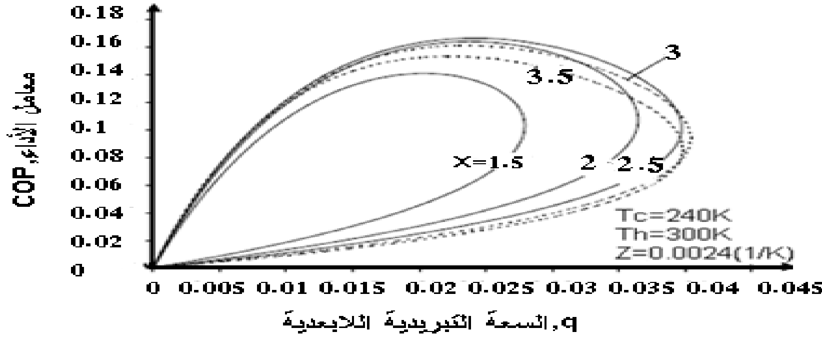
3. لحساب الإيصاليّة الحراريّة للمادة الكهروحراريّة:

$$k = (62605 + 277.7T_m + 0.4131T_m^2).10^{-4} \quad (4\text{-}19)$$

وحيث أنّ :

$$T_m = \frac{T_h + T_C}{2} \quad (4\text{-}20)$$

هي درجة الحرارة المتوسطة للمبرّد، شروط العمل هنا اختيرت فرضاً ($T_h = 300K$ ،$T_C = 240K$)، من الواضح أن نرى كلاً من q_C سعة التبريد الأعظميّة و COP المثالي متغيرين بشكل واسع مع قيم X المختلفة.



الشكل (4- 2) يُظهر العلاقة بين السعة التبريديّة اللابعديّة q_c ومعامل الأداء للمبرّد الكهروحراري الثنائي ذي التصميم الهرمي عند قيم مختلفة لـــلمعامل X.

عندما سعة التبريد q_c تتناهى للصفر فإنّ المبرّد الكهروحراري الثنـــائي ســـيملك فارقاً حرارياً أعظمياً أي ستكون قيمة Θ_h أعظميّة، وعندما T_c ثابتة فإنّ Θ_h يمكن حسابها من العلاقة (15- 4):

$$\Theta_h = 1 + 2.j - j^2.\frac{1}{Z.T_c}\left(1 - Z.T_c + \frac{1 + Z.T_c}{X}\right) - \frac{1}{2}j^3\frac{1}{Z.T_c}\left(1 - \frac{1}{X}\right) \quad (4\text{-}21)$$

عندما Θ_h أعظمية وعندما $(d\Theta_h/dj = 0)$ بناء عليه يمكـــن حـــساب j التيـــار الكهربـــائي اللابعدي باستخراج j_Θ من المعادلة (21−4).

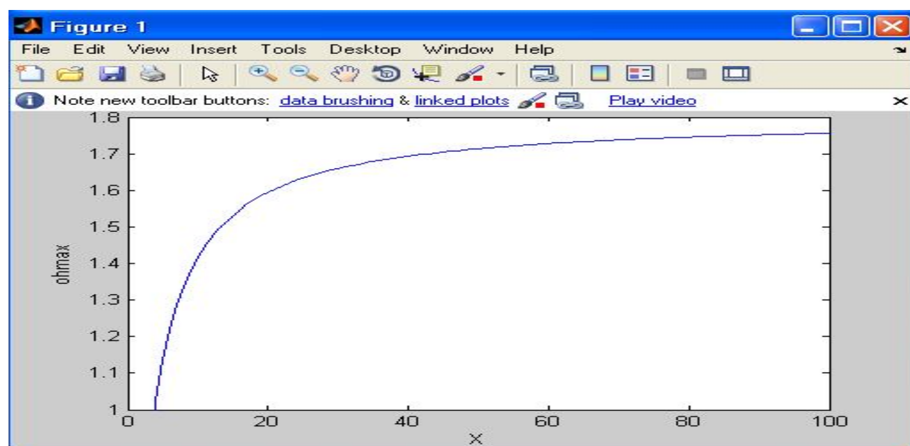
$$j_\Theta = \frac{2}{3}\left(Z.T_c - \frac{X+1}{X-1} + \sqrt{\left(\frac{X+1}{X-1}\right)^2 + \frac{Z.T_c(X-2)}{X-1} + (Z.T_c)^2}\right) \quad (4\text{-}22)$$

التابع $\Theta_{max}(X)$ يمكن أن نرسمه في الشكل (4 - 3) باستخدام المعادلتين السابقتين ضمن برنامج مصمم بلغة ***(MATLAB)***، ولنجد أنّ الفارق الأعظمي لدرجات الحرارة للمبـــرّد الثنائي الطبقات ذي التصميم الهرمي يتزايد تدريجياً مع X حتى قيمـــة محـــددة، ويمكـــن تحديدها بجعل $(X \to \infty)$ في المعادلتين (21− 4) و(22−4) وتبسيطهما لنجد:

$$j_\Theta X \longrightarrow \infty = \frac{2}{3}\left(Z.T_c - 1 + \sqrt{1 + Z.T_C + (Z.T_c)^2}\right) \quad (4\text{ - }23)$$

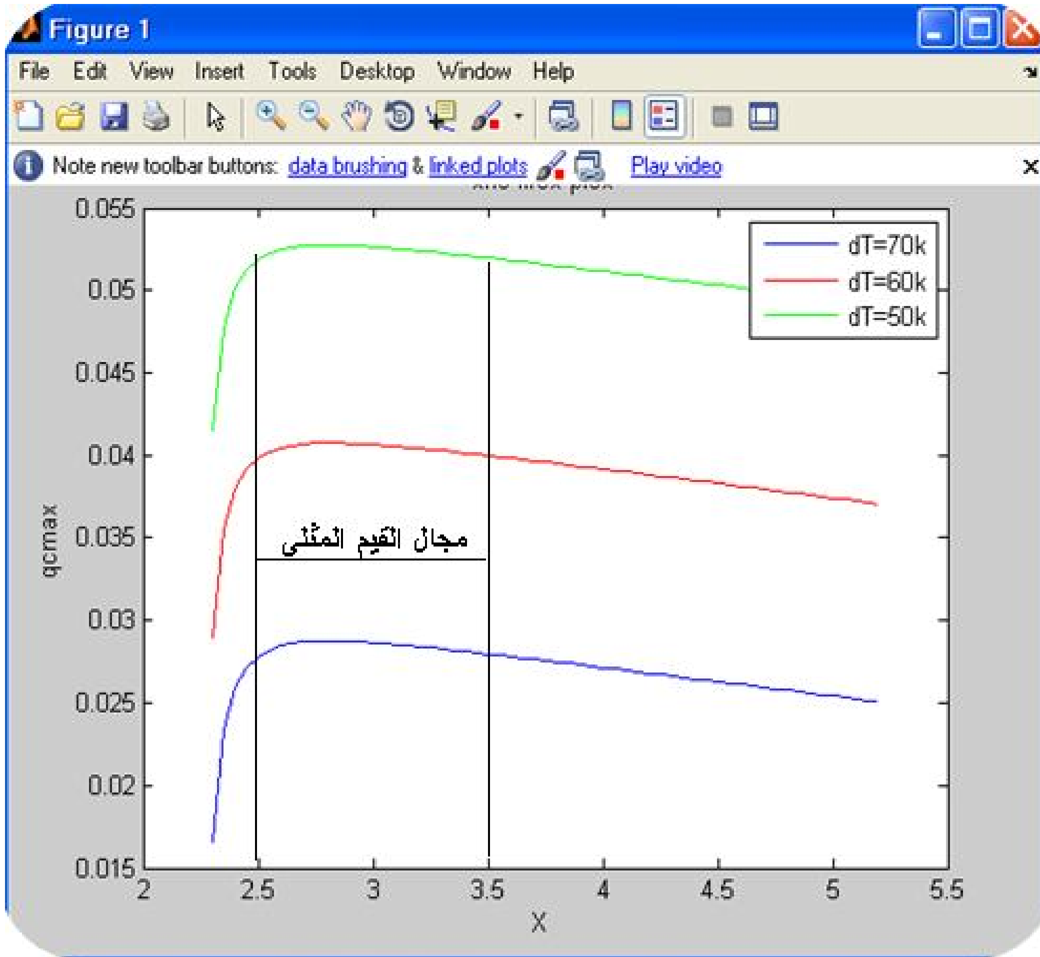
$$\Theta_h X \to \infty = 1 + 2.j - j^2.\left(\frac{1}{Z.T_c} - 1\right) - \frac{1}{2}.j^3.\frac{1}{Z.T_c} \quad (4\text{-}24)$$

ومن المعادلة (24-4) سينتج قيمة لـــΘ مـــساوية لـــــ ($_{max}\Theta = oh_{max} = 1.751$) وذلك عندما (**$j_\Theta\ x \to \infty = 0.638$**)، وتحدد هذه القيمة من المعادلة (23-4) بشرط درجـــة الحرارة للنهاية الباردة ($Z = 0.0024$ 1/K و $Tc = 240$ K)، هذا يعني أنّ الفارق الحراري محدود للمبرّد الكهروحراري الثنائي ذي التصميم الهرمي وهو تقريباً (K 180) وبـــدون شك هذه القيمة أكبر بكثير مما سيوفره نظام التبريد الكهروحراري الأحادي الطبقة.

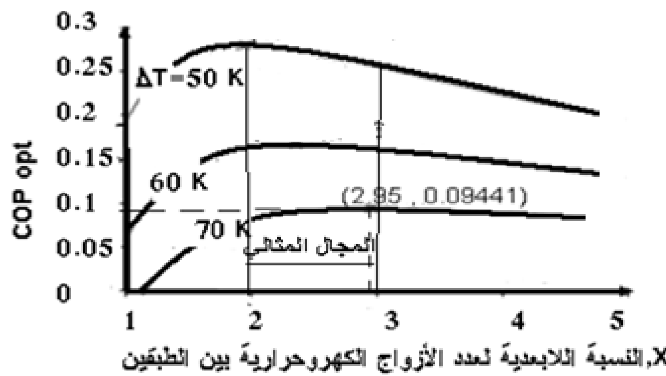


الشكل (4- 3) يبين علاقة الفارق الحراري الأعظمي اللابعدي $\theta_{max(X)}$ للمبرّد الكهروحراري ذي التصميم الهرمي بدلالة نسبة عدد الأزواج الكهروحراريّة بين الطبقات.

إنّ سعة التبريد q_c تبلغ قيمة أعظميّة في المعادلة (15 -4) عندما نشتق $(dq_C/dj= 0)$ ، وبرسم العلاقة بين $(j_q \sim q_{c\ max\ (X)})$ نرى ذلك في الشكل (4- 4) حيث نلاحظ من خلال المخطط مجالاً مفضلاً محدداً لـ X نسبة عدد الأزواج الكهروحراريّة بين الطبقات وهو بين (3.5 ÷ 2.5) عندما المبرّد الثنائي يطلب عمله بسعة تبريد أعظميّة، وبالمثل المعامل (φ) في المعادلة (16 -4) يمكن أن يأخذ قيمة أصغريّة عندما $(d\varphi/dj =0)$ ، ونرى في الشكل(4- 5) منحنى $COP_{OPT(X)}$ المثالي نستطيع منه معرفة قيمة X المثالية المحددة بين (3 ÷ 2) حيث المبرّد يقترب من معامل أداء مثالي، وبناء عليه فإنّ قيمة X المثالية للمبرّد الثنائي الطبقات ذي التصميم الهرمي محددة بين (3 ÷ 2.5)، علماً أنّ عدد الأزواج الكهروحرارية فرضاً هي (13 و 37) زوجاً في الطبقتين الأولى والثانية على التوالي أي المجموع الكلي $N_0 = 50$.



الشكل (4 -4) يبين تغير السعة التبريديّة اللابعدية $q_{c\ max}$ (X) للمبرّد الكهروحراري الهرمي بدلالة نسبة عدد الأزواج الكهروحراريّة بين الطبقتين بشروط (T_h = 300 K , Z = 0.0024 1/ K).



الشكل (4 -5) يبين تغيّر معامل الأداء المثالي $COPopt_{(X)}$ للمبرّد الكهروحراري ذو التصميم الهرمي بدلالة نسبة عدد الأزواج الكهروحراريّة بين الطبقتين بنفس الشروط السابقة.

4- 3 - المبرّد الكهروحراري ذو التصميم (الخاص) المتوازي المستطيلات

Cuboid-Styled Thermoelectric Cooler:

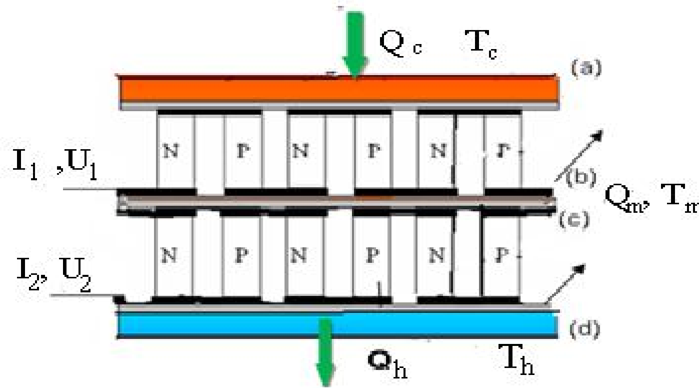
نرى شكلاً توضيحياً لهذا المبرّد في الشكل (4- 6) حيث نسبة التيار الكهربائي بين الطبقة الثانية (الساخنة) والطبقة الأولى تعرّف بـــ t، والعدد الكلي للأزواج نرمزه أيــضاً بـــ N_0 ليمكن إجراء مقارنة صحيحة مع المبرّد الكهروحراري الثنائي الهرمي، وبطريقة مماثلة نكتب معادلات التوازن الحراري اللابعديّة عند كل وصلة بدأً من (a) إلى (d):

$$q_{c1} = j - \frac{1}{2} j^2 \frac{1}{Z.T_c} - (\Theta_m - 1) \tag{4 -25}$$

$$q_{h1} = j.\Theta_m + \frac{1}{2}.j^2.\frac{1}{Z.T_C} - (\Theta_m - 1) \tag{4 -26}$$

$$q_{c2} = j.t.\Theta_m - \frac{1}{2}.(j.t)^2.\frac{1}{Z.T_C} - (\Theta_h - \Theta_m) \tag{4 -27}$$

$$q_{h2} = j.t.\Theta_h - \frac{1}{2}.(j.t)^2.\frac{1}{Z.T_C} - (\Theta_h - \Theta_m) \tag{4 -28}$$



الشكل (4 - 6) يبين المبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات ذو تصميم بشكل متوازي المستطيلات.

حيث أنّ التيار الكهربائي اللابعــدي j ونــسبة درجــة الحــرارة (Θ_i ، i= m،h)، بالاستفادة من المعادلتين (12- 4) و(13- 4) على التوالي وبنفس الطريقة الــسابقة يعطــى التدفق الحراري اللابعدي (q_i ، i= C_1،C_2،h_1، h_2):

$$q_i = \frac{2Q_i}{N_0 k.T_C} \tag{4 -29}$$

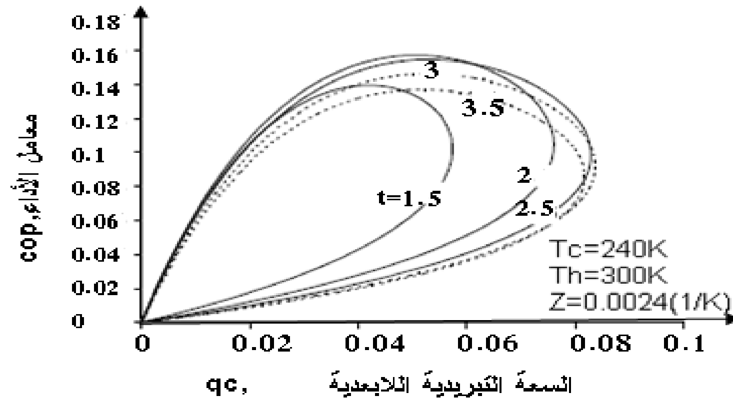
بمساواة المعادلتين $q_{h1}= q_{C2}$ نستنتج علاقة كلٌ من السعة التبريديّة والمعامل (φ) للمبرّد الكهروحراري الثنائي ذو التصميم متوازي المستطيلات بطريقة مشابهة لما سبق:

$$q_c = j - \frac{1}{2}.j^2.\frac{1}{Z.T_C} + 1 - \frac{\frac{1}{2}.j^2.\frac{1+t^2}{Z.T_C} + \Theta_h + 1}{2 - j + j.t} \tag{4 -30}$$

$$\varphi = \frac{q_{h2}}{q_{c1}} = \frac{j.t.\Theta_h + \frac{1}{2}.j^2.t^2.\frac{1}{ZT_C} - \Theta_h + ((\frac{1}{2}.j^2.\frac{t^2+1}{ZT_C} + \Theta_h + 1)/((2-j+j.t))}{j - \frac{1}{2}.j^2.\frac{1}{Z.T_C} + 1 - ((\frac{1}{2}.j^2.\frac{t^2+1}{ZT_C} + \Theta_h + 1)/(2-j+j.t))} \tag{4 -31}$$

باستخدام المعادلتين (31-4) و(30-4) يمكن أن نرسم العلاقة بـين ($q_C \sim COP$) للمبـرّد الكهروحراري في هذه الحالة الموضحة في الشكل (4 - 7) بشروط عمل $q_C = 0$ و قيمة $T_C = 240\ K$، نسبة درجة الحرارة اللابعدية Θ_h يمكن أنّ نحددها أيضاً بالعلاقة:

$$\Theta_h = 1 + j.(t+1) + j^2.\left(t - 1 - \frac{t^2+3}{Z.T_C}\right) - \frac{1}{2}.j^3.\frac{t-1}{Z.T_C} \qquad (4\text{-}32)$$

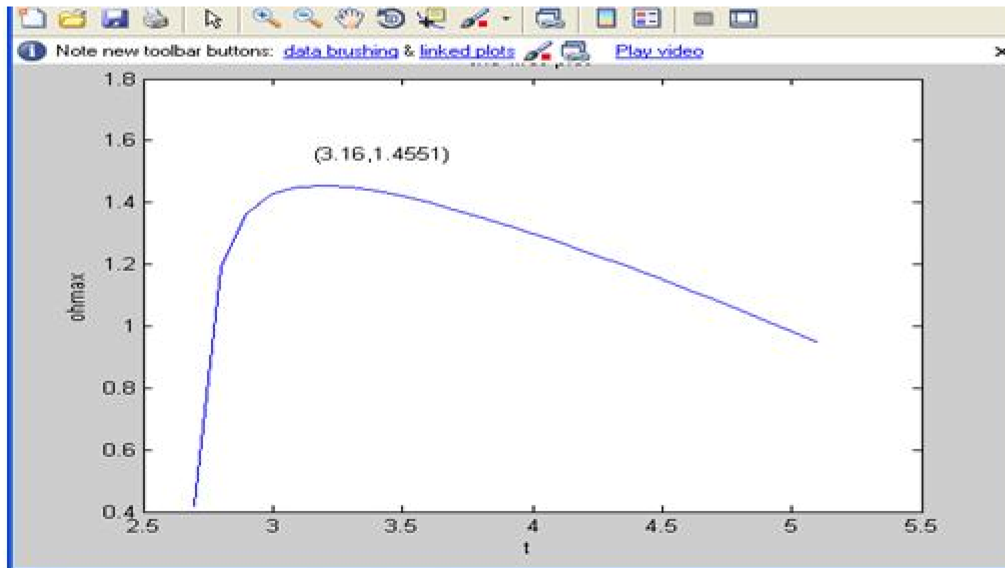


الشكل (4 -7) يبين العلاقة بين السعة التبريديّة اللابعدية ومعامل الأداء للمبرّد الكهروحراري ذي التصميم بشكل متوازي المستطيلات بدلالة نسبة التيار الكهربائي بين الطبقتين.

وباستخدام ($d\Theta_h/dj = 0$) اشتقاق التيار اللابعدي عند سعة تبريد أعظميّة التيار يعطى:

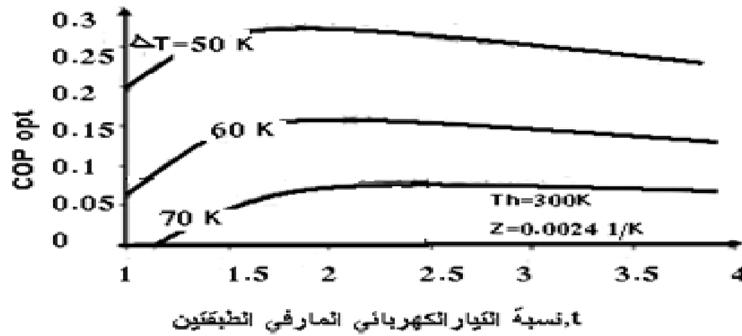
$$j_\Theta = \frac{2}{3}\left(Z.T_C - \frac{t^2+3}{2(t-1)} + \sqrt{(Z.T_C)^2 - \frac{1}{2}ZT_C\left[\frac{t^2.(t-2)}{(t-1)^2} - 3\right] + \frac{(t^2+3)^2}{4(t-1)^2}}\right) \qquad (4\text{-}33)$$

لتمثيل علاقة المعادلتين {(32 و33) -4} نرى الشكل (4- 8) الذي يمثل منحني $\Theta_{max(t)}$ لنجد أنّ نسبة الفارق الحراري الأعظمي للمبرّد الكهروحراري في هذه الحالة لــه نهايــة حدية عند t صغيرة وتساوي $\Theta_{max}=1.455$ عند $t = 3.16$ وعند $T_c = 240\ K$.

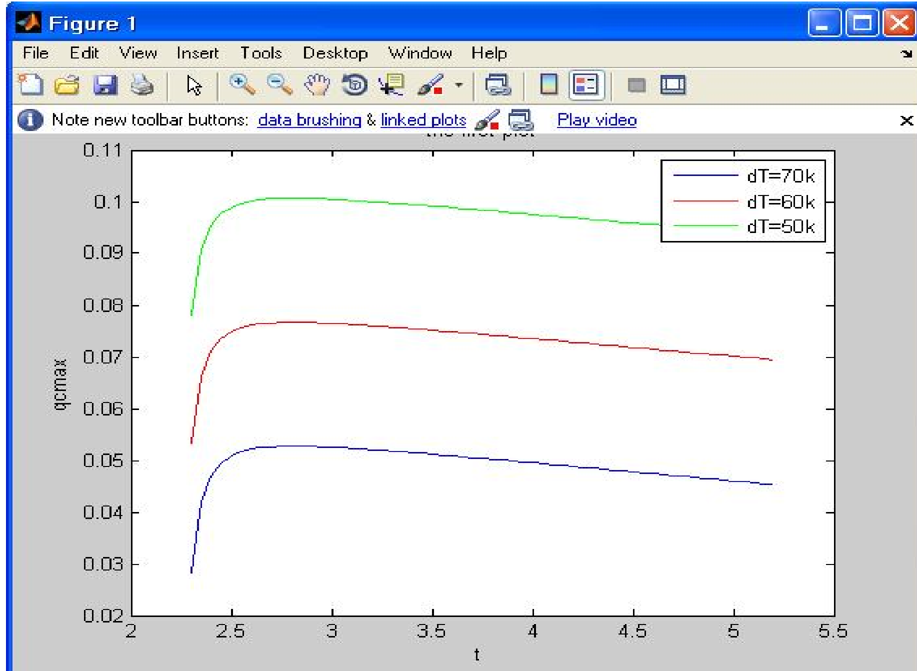


الشكل (4- 8) يبين تغير الفارق الحراري الأعظمي $\Theta_{max(t)}$ للمبرّد الكهروحراري ذي التصميم المتوازي المستطيلات بدلالة نسبة التيار الكهربائي بين الطبقتين (على الشكل إحداثيات قمة المنحني).

بتفاضل q_c في المعادلة (30 -4) نسبة لـــ j لنحدد السعة التبريديّة $q_{c\ max(t)}$، فمن الشكل (4- 9) الذي يمثل العلاقة بين ($q_{max} \sim t$) عند فروقات حرارية مختلفة ويحدد القيمة المثالية لـــ t نسبة التيار الكهربائي بين الطبقات بين (2.5 ÷ 3.5) عند نقطة سعة التبريد الأعظميّة، و بشكل مماثل $COP_{opt(t)}$ يمكن أن يحدد بتفاضل φ في المعادلة (31- 4) نسبة لـــ j، و يرى في الشكل (4- 10) هناك قيمة مثالية محددة لـــ t بين (3÷ 2) عند نقطة COP مثالي، أذا فالقيمة المثالية لـــ t للمبرّد الثنائي هنا هي أيضاً (3÷2.5).



الشكل (4- 10) يبين تغير معامل الأداء المثالي $COP_{OPT(t)}$ للمبرّد الكهروحراري الثنائي ذي التصميم متوازي المستطيلات بدلالة نسبة التيار الكهربائي بين الطبقتين بنفس الشروط الموضّحة على الشكل.



الشكل (4- 9) يُظهر تغير السعة التبريديّة اللابعدية $q_{c\,max\,(t)}$ للمبرّد الثنائي بالحالة الثانية بدلالة نسبة التيار الكهربائي المار في الطبقتين عند نفس شروط العمل (T_h = 300 K , Z = 0.0024 1/ K).

4- 4 - مقارنة التصميم الأمثل Comparison of optimum design:

بنفس شروط العمل (G = 1.8 x 10^{-3} m ,N_0 =50 ،T_h =300 K ،T_c = 240 K) ، والتي هي المجموع الكلي لعدد الأزواج الكهروحراريّة في المبرّد الثنائي بتصميميه 50 زوجاً، في التصميم الخاص (المتوازي المستطيلات) عددهما متساوٍ (مناصفة) في الطبقتين وكل طبقة يمر فيها تيار مختلف، في التصميم الهرمي التيار المار نفسه يمر في الطبقتين، والاختلاف في عدد الأزواج الكهروحراريّة بحسب قيمة النسبة المثلى المختارة ($X= N_2 / N_1 = 3.17$) ، يمكننا إجراء المقارنة بين التصميمين السابقين للمبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات في حالتي السعة التبريديّة العظمى ومعامل الأداء الأمثل التي تظهر في الجدول (4- 1)، سنبين حساب حالة واحدة وذلك باستخدام المعادلات التالية [8] مع مراعاة شروط العمل والتوصيل.

■ **التصميم الهرمي:** **حالة $Q_{c\,max}$:**

يتم حساب كلّ من التيار الكهربائي والكمون المار في كل طبقة والاستهلاك الطاقي باستخدام المعادلات:

$$U_1 = N_1.[\alpha.(T_h - T_C) + I.R] \tag{4-34}$$

نحسب قيمة المقاومة الكهربائيّة ومعامل سيبك من المعادلة (4 -5):

$R= 2*\rho / G =2* 95*10^{-6}/0.0018 = 0.01056\ \Omega$ حيث ρ تحسب من المعادلة (4 -18)، منه بالتعويض في المعادلة (4 -34):

U_1= 12 * [0.0002 * (300 -240) + 7.45* 0.01056] = 1.08 V

U_2= 38* [0.0002* (300 -240) + 7.45* 0.01056] = 3.5 V

■ **حساب Qc:** باستخدام المعادلة (4-1) **نعوض لنجد:**

Q_c= [7.45* 0.0002* 240 - 0.5* $(7.45)^2$ *0.01056 - 0.0064 *(270 -240)] *50 / (3.17 +1) = 3.1 W

حيث تم حساب: k= 2* *k* * G =2 *1.7 * 0.0018 = 0.0064 W/K

■ **حساب P:**

P = I * (U_1+U_2) = 7.45*(1.08+3.5) = 34.121 W

■ **حساب COP:**

COP = Q_c / P = 3.1/ 34.12 = 0.09

مع العلم أنّ السعة التبريديّة تتناسب مع معامل البناء الداخلي G، والتيار الكهربائي المار (I_i ،i= 1,2) أيضاً يتناسب معه.

الجدول (4- 1) يبين مقارنة قيم مميزات نظام التبريد الكهروحراري بتصميميه.

المميزة		التصميم الهرمي		التصميم المتوازي المستطيلات	
		Qc_{max}	COP_{opt}	Qc_{max}	COP_{opt}
عدد الأزواج الكهروحراريّة – في الطبقة الأولى	N_1	12	15	25	25
عدد الأزواج الكهروحراريّة– في الطبقة الثانية	N_2	38	35	25	25
التيار الكهربائي المار– في الطبقة الأولى	I_1 (A)	7.45	4.05	3.54	2.63
التيار الكهربائي المار– في الطبقة الثانية	I_2 (A)	7.45	4.05	10.05	5.53
الكمون في الطبقة الأولى	U_1 (V)	1.08	0.81	1.16	0.91
الكمون في الطبقة الثانية	U_2 (V)	3.51	1.94	3.02	1.84
السعة التبريديّة للنظام	Qc (W)	3.08	1.85	3.21	1.97
الاستطاعة المستهلكة في النظام	P (W)	34.12	11.15	34.49	12.58
معامل الأداء $COP = Qc / p$	COP	0.09	0.17	0.093	0.16

ملاحظة: إنّ العامل (U) يرمز للكمون الداخل لكل طبقة بينما (P) يرمز للطاقة الكلية للنظام.

الفصل الخامس

مقارنة أداء أنظمة التبريد الكهروحراريّة أحاديّة وثنائيّة الطبقات

Comparison of The Performance of Single- and Two-Stage Thermoelectric Cooling Systems

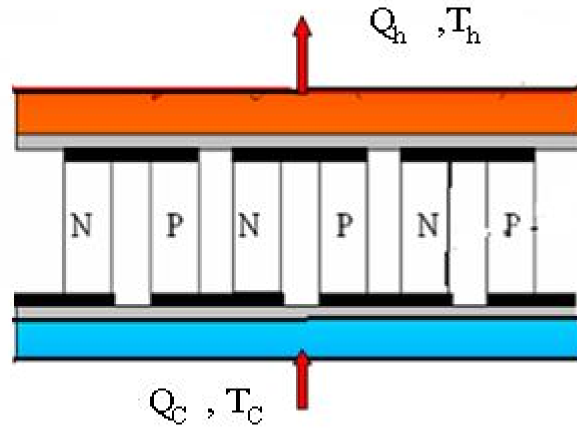
5- 1- مقدمة Introduction:

بما أنّ المواد نصف الناقلة تتميز بمعامل سيبك عال، أي إيصاليّة كهربائيّة جيدة وإيصاليّة حراريّة ضعيفة مما ساهم في تحسين استخدام مبدأ بيلتيه في الأجهزة الكهروحراريّة لغاية التبريد، وأبسط شكل لمبرّد كهروحراري هو النظام المكون من طبقة واحدة ولكن بسبب الأداء المحدود للمواد الكهروحراريّة المبرّدات الأحاديّة يمكن أن تعمل فقط بفارق حراري صغير على الأغلب حتى K 80 بين جهتي النظام عند درجة حرارة

الغرفة 300 K، ولكن إذا كانت نسبة درجة الحرارة كبيرة بين المنبع الحــراري والحيّــز المراد تبريده، فالمبرّدات الكهروحراريّة الأحاديّة ستضعف فعاليتها ممــا يتطلــب وجــود أنظمة أكثر فعاليّة كثنائيّة الطبقات أو المتعددة وهي طريقة مهمّة لتحسين أداء المبــرّدات الكهروحراريّة.

5- 2- المبرّد الكهروحراري أحادي الطبقة Single-Stage Thermoelectric Cooler :

المبرّد الكهروحراري الأحادي البسيط هو نظام مكون من طبقة واحدة من المواد شبه الموصلة (Semiconductors) يضمّ عدداً من الأزواج الكهروحراريّة مــن مــواد النــوع (N-type) والنوع (P -type) المتصلة كهربائيّاً على التسلسل بــصفائح معدنيــة موصــلة للكهرباء وحراريّاً على التوازي نرى ذلك في الشكل (5- 1).



الشكل (5- 1) يمثّل مبرّداً كهروحراريّاً ذا طبقة واحدة من المواد نصف الناقلة.

نعرّف (Q_c , Q_h) بــالحرارة المنبــوذة مــن الجهــاز إلــى مــاص الحــرارة (Heat Sink) ذي درجة الحرارة العالية ثم للوسط الخارجي والحرارة الممتصة من المكان المراد تبريده ذو درجة الحرارة المنخفضة إلى الجهاز على التوالي، ونعــرّف الرمــز N_0 الدّال على عدد أزواج العناصر شبه الموصلة، α معامل سيبك للــزوج الكهروحــراري، نظام التبريد هنا يعمل بين منبعين (جهتين) حراريين بدرجة حرارة (T_c , T_h) علمــاً أنّ الجهاز معزول كهربائيّاً وحراريّاً عن البيئة المحيطة عدا الوصلات الملامــسة للمنبعــين (الجهتين)، فعندما يمر التيار الكهربائي I خلال الجهاز الكهروحــراري فــإنّ التــدفقات الحراريّة الناشئة ($N_0.\alpha.I.T_h$, $N_0.\alpha.I.T_c$) الأول يمتص من الحيّز المبرّد ذي درجــة الحرارة المنخفضة والثاني يطرح للوسط الخارجي من خلال نابــذ الحــرارة ذي درجــة

الحرارة العالية بواسطة الجهاز الكهروحراري بفعل تأثير بيلتيه، ومنه عند عمل الجهاز هناك ثلاثة تأثيرات حراريّة إضافية أساسية تظهر في النظام إضافة لحرارة بيلتيه هي:

1- حرارة جول (Heat Joule) ناتجة عن مرور التيار الكهربائي ($Q_j = I^2. R$), وحيث أنّ ($R= \rho.L /A$).

2- الحرارة الضائعة الناتجة عن اختلاف درجات الحرارة بين طرفي الجهاز (وصلتي التلامس).

3- حرارة طومسون ناتجة عن التدرج الحراري في درجات الحرارة في المواد شبه الموصلة والتيار الكهربائي ولكن معامل طومسون في الجهاز الكهروحراري عادة صغير القيمة حيث وجد أنّ تأثير حرارة طومسون على أداء الجهاز الكهروحراري صغير مقارنة مع كمية الحرارة بسبب التأثيرات الأخرى لذلك يهمل، وكما أنّ معامل سيبك α ليس متعلقاً فقط بخصائص المواد شبه الموصلة بل أيضاً بدرجة حرارة العمل وسنفرض أنّه ثابت تقريباً. من خلال نظرية عدم التوازن الترموديناميكي لعناصر النظام الكهروحراري نجد:

- بالنسبة للوصلة الساخنة:

$$Q_h = Q_{\pi,h} + \frac{1}{2}Q_j - Q_k \qquad (5\text{-}1)$$

بالتعويض بقيم التدفقات الحراريّة نجد:

$$Q_h = N_0.\alpha.I.T_h + \frac{1}{2}I^2N_0.R - N_0.k.(T_h - T_c) \qquad (5\text{-}2)$$

وعلى فرض أن نصف حرارة جول تصل للوصلة الباردة فالحمل الحراري الممتص بالنسبة للوصلة الباردة:

$$Q_c = Q_{\pi,C} - \frac{1}{2}Q_j - Q_k \qquad (5\text{-}3)$$

بالتعويض بقيم التدفقات الحراريّة نجد:

$$Q_c = N_0.\alpha.I.T_c - \frac{1}{2}I^2N_0.R - N_0.k.(T_h - T_c) \qquad (5\text{-}4)$$

وحيث إنّ (R, k) هما الإيصاليّة الحراريّة والمقاومة الكهربائيّة للزوج الكهروحراري وباستخدام المعادلتين {(1و3)- 5} والاستفادة من تعريف مميزة الشكل للعناصر الكهروحراريّة نحصل على علاقة معامل الأداء:

(5 -5)

$$cop = \frac{Qc}{Q_h - Qc} = \frac{N_0.\alpha.I.T_C - \frac{1}{2}I^2.N_0.R - N_0.k.(T_h - T_C)}{[N_0.\alpha\ I.T_h + \frac{1}{2}I^2N_0.R - N_0.k.(T_h - T_C)] - [N_0.\alpha.I.T_C - \frac{1}{2}I^2.N_0.R - N_0.k.(T_h - T_C)]}$$

بالتعويض والاختصار والقسمة على الحد $(1/ T_c .k)$ لحدي الكسر نحصل علـــى علاقـــة معامل الأداء بالشكل المختصر:

$$cop = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{j - \frac{\Theta}{2}\frac{j^2}{Z.T_h} + (1 - \Theta)}{(\Theta - 1).j + \frac{\Theta.j^2}{Z.T_h}} \quad (5\ \text{-}6)$$

وعلى علاقة معدّل التبريد اللابعدية للعناصر الكهروحراريّة:

(5 -7)

وعلاقـــــة $r = \frac{Qc}{N_0.k.T_h} = \frac{N_0.\alpha.I.T_c - \frac{1}{2}I^2N_0.R - N_0k.(T_h - T_c)}{N_0.k.T_h} = \frac{j}{\Theta} - \frac{j^2}{2.Z.T_h} + (1/\Theta - 1)$

طاقة الدخل اللابعديّة للعناصر الكهروحراريّة:

$$P = \frac{p}{N_0.k.T_h} = \frac{Q_h - Q_c}{N_0.k.T_h} = \frac{j^2}{Z.T_h} + (1 - 1/\Theta).j \quad (5\text{-}\ 8)$$

وبالاستفادة من العلاقات التالية المعرّفة للتيار الكهربائي اللابعدي ومميزة الـــشكل للعنصر الكهروحراري نجد:

$$Z = \alpha^2/R.k \qquad ،\Theta = T_h/T_c \quad ،j=\alpha I/k \Rightarrow \alpha I=j.k \qquad (5\ \text{-}9\ )$$

وحيث إنّ $(\theta$، j، I،$Z)$ نسبة درجات الحرارة اللابعديّة والتيار الكهربائي اللابعدي والتيـــار الكهربـــائي المـــار ومميـــزة الـــشكل علـــى التـــوالي وحيـــث إنّ: (10- 5) $(p = Q_h - Q_c)$، ومن خلال المعادلة (6- 5) وعندما $(cop = 0)$ نجد:

$$(5\text{-}11)\ \frac{j - \frac{\Theta}{2}\frac{j^2}{Z.T_h} + (1 - \Theta)}{1} = 0$$

وبحل المعادلة عن طريق $\Delta = (B^2 - 4.A.C)$ والاستفادة من العلاقة $\Theta = T_h/T_c$ نـــسبة درجات الحرارة اللابعديّة نجد:

$$j = Z.T_c\left[1 - \sqrt{1 - 2.(\Theta - 1)/(Z.T_c)}\right] \equiv j_{min}$$

$$(5\text{-}12)\ j = Z.T_c\left[1 + \sqrt{1 - 2(\Theta - 1)/(Z.T_c)}\right] \equiv j_{max}$$

في الحالة العمليّة للمبرّد، يجب أن تكون قيمة معامل الأداء COP ذات قيمـــة حقيقيـــة وموجبة، ومن الواضح أنّ هذا يحدث فقط عندما التيـــار الكهربـــائي اللابعـــدي للنظـــام

الكهروحـــــــراري الأحــــــــادي الطبقــــــــة يقــــــع ضــــــمن منطقــــــة:

$$j_{min} < j < j_{max} \quad (5\text{-}13)$$

ونسبة درجة الحرارة الجهة الساخنة إلى الجهة الباردة تقع ضمن الشرط:

$$(5\text{-}14)\ \Theta \prec \frac{1+\sqrt{1+2.Z.T_h}}{2}$$

بالتالي المبرّد الكهروحراري ذو الطبقة الواحدة يعمل بشكل طبيعي ضمن هذه الشروط، فعندما تكون المعادلتان (13 - 5) و(14 - 5) غير محققتين معاً، يفقد النظام دوره.

5- 3 - المبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات Two–Stage Thermoelectric Cooler:

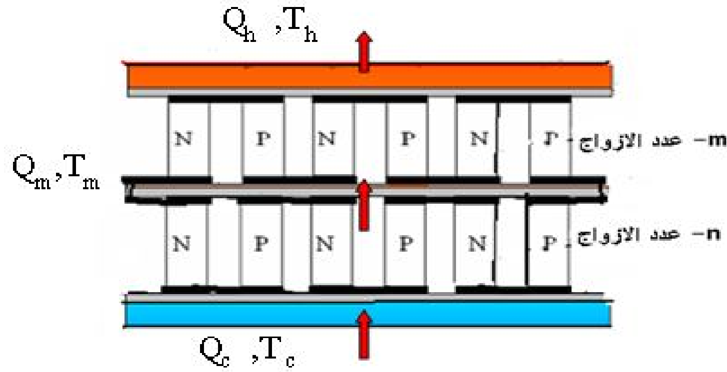
من المعادلة (6- 5) نرى أنّ معامل الأداء للمبرّد الكهروحراري الأحادي الطبقــة يتناقص مع ازدياد نسبة درجة حرارة الطبقة الساخنة إلى الطبقة الباردة (النسبة اللابعديــة θ)، فعند θ كبيرة فإنّ معامل الأداء للمبرّد الأحادي سيكون مساوياً للصفر أو أصغر مــن الصفر وبالتالي هذا يدعو لاستخدام الأجهزة الكهروحراريّة المتعددة الطبقات في التبريــد للحصول على فارق حراري كبير بين الجهتين الباردة والساخنة للمبــرّد، والــشكل (5-2) يبين شكلاً لنظام تبريد كهروحراري ثنائي الطبقة. ولغاية المقارنة المناسبة ســنفرض أنّ عدد الأزواج الكهروحراريّة من النوعين (N-type و P-type) في هــذا المبــرّد N_0 وهــو العدد نفسه في النظام الأحادي، وعند مرور التيار الكهربائي I خلال كــل عنــصر فــي النظام فإنّنا باستخدام معادلة التوازن الحراري نجد:

$$Q_h = m.\alpha.I.T_h + \frac{1}{2}I^2 m.R - m.k.(T_h - T_m) \quad (5\text{-}15)$$

$$Q_m = m.\alpha.I.T_m - \frac{1}{2}I^2 m.R - m.k.(T_h - T_m) \quad (5\text{-}16)$$

$$Q_m = n.I.\alpha.T_m + \frac{1}{2}I^2 n.R - n.k.(T_m - T_c) \quad (5\text{-}17)$$

$$(5\text{-}18)\ Q_c = n.I.\alpha.T_C - \frac{1}{2}I^2 n.R - n.k.(T_m - T_c)$$



الشكل (5 – 2) يمثل نظام تبريد كهروحراري ثنائي الطبقات.

حيث أنّ ($N_0 = m+ n$) وإنّ (m , n) عدد الأزواج الكهروحراريّة للعناصر نصف الناقلة في الطبقة الأولى والثانية على التوالي، و Q_m التدفق الحراري بين الطبقتين في هذا النظام وT_m درجة حرارة الوصلة الوسطى التي تحسب من مساواة المعادلتين (16- 5) و(17-5) ونعوضها في المعادلتين (15- 5) و (18 - 5) لنجد:

$$q_h = m.j + \frac{m.j^2}{2Z.T_h} - m + m.\frac{\frac{(m+n)}{2}\frac{j^2}{Z.T_h} + m + \frac{n}{\Theta}}{(m-n).j + (m+n)} \quad (5\text{-}19)$$

$$(5\text{-}20)\quad q_c = n.j - \frac{n.j^2}{2Z.T_c} + n - n.\frac{\frac{(m+n)}{2}\frac{j^2}{Z.T_c} + m.\Theta + n}{(m-n).j + (m+n)}$$

وحيث $q_h = Q_h / (k.T_h)$ ، $q_c = Q_c / (k.T_c)$، وفي تصميم مبرّد كهروحراري ثنائي الطبقات يجب أولاً تحقيق مثالية البنية الداخلية للجهاز الكهروحراري ولأجل هذه الغاية نعرّف معامل البناء الداخلي X (Internal Structure) الذي يتعلق بالبنية الداخلية للجهاز الكهروحراري وهو يساوي ($X = m / n$)، ومن المعادلتين (19- 5) و (20- 5) يمكن أن نستنتج علاقة COP معامل الأداء للنظام:

$$cop = \frac{a_1 X + a_2}{b_1 X^2 + b_2 X + b_3} = \frac{c_1 j^3 + c_2 j^2 + c_3 j + c_4}{d_1 j^3 + d_2 j^2 + d_3 j} \quad (5\text{-}21)$$

وعلاقة معدّل التبريد اللابعدي لأزواج العناصر الكهروحراريّة:

$$r = \frac{1}{\Theta}.\frac{a_1 X + a_2}{f_1 X^2 + f_2 X + f_3} \quad (5 - 22)$$

وعلاقة طاقة الدخل اللابعدية لأزواج العناصر الكهروحراريّة:

$$(5\text{-}23)\quad p = \frac{1}{\Theta}.\frac{b_1 X^2 + b_2 X + b_3}{f_1 X^2 + f_2 X + f_3}$$

وحيث إنّ قيم المتحولات $a_1,a_2,b_1,b_2,b_3,c_1,c_2,c_3,c_4,d_1,d_2,d_3,f_1,f_2,f_3$ كالتالي:

الجدول (5 -1) يبين قيم المتحولات المستخدمة.

$a_1 = (j+1)^2 - \frac{j^2}{Z.T_h}(1+\frac{1}{2}j).\Theta - \Theta$	$d_3 = 2.X.(\Theta - 1)$
$a_2 = (1+j)(1-j) + \frac{j^2}{Z.T_h}(\frac{1}{2}j-1).\Theta - 1$	$c_1 = \frac{1-X}{2.Z.T_h}\Theta$
$b_1 = (\frac{1}{2}\frac{j}{Z.T_h} + \frac{1}{Z.T_h} + 1).j^2\Theta$	$c_2 = X - \frac{X}{Z.T_h}.\Theta - 1 - \frac{1}{Z.T_h}.\Theta$
$b2 = (\frac{2.j}{Z.T_h}.\Theta + 2(\Theta-1) - j - j.\Theta).j$	$c_3 = 2.X$
$b_3 = j^2.(1+\frac{1}{Z.T_h}\Theta - \frac{1.j}{2.Z.T_h}\Theta)$	$c_4 = (1-\Theta).X$
$d_1 = \frac{1}{2}.\frac{(X^2-1)}{Z.T_h}\Theta$	$f_1 = 1 + j$
$d_2 = (x-1).(x.\Theta - 1) + \frac{(1+x)^2}{Z.T_h}\Theta$	$f_2 = 2$, $f_3 = 1 - j$

5- 4- مميزات الأداء عند قيمة أعظميّة لمعامل الأداء

Performance Characteristics at COP $_{max}$:

باستخدام الشروط الحدية: نشتق المعادلة (21- 5) بالنسبة لــ X أولاً ثم بالنــسبة لــ j ثانياً أي:

$$\partial(cop) / \partial X = 0 \quad , \quad \partial(cop) / \partial j = 0 \qquad (5 - 24)$$

ومن المعادلة (21- 5) يمكن أن نبرهن أنّه عندما:

$$X = (F - a_2)/a_1 \qquad (5 - 25)$$

وعندما:

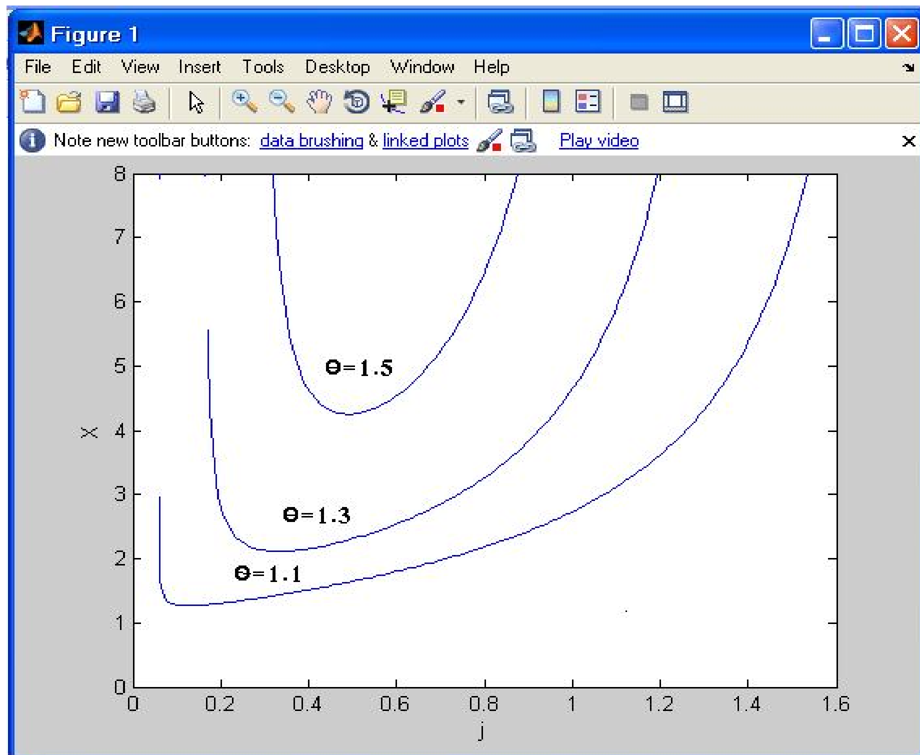
$$(c_1d_2 - c_2d_1)j^4 + 2(c_1d_3 - c_3d_1)j^3 - 3c_4d_1j^2 - 2c_4d_2j - c_4d_3 = 0 \qquad (5 -26)$$

إنّ معامل الأداء يبلغ قيمة أعظميّة وحيث F:

$$F = \sqrt{a_2^2 + (a_1b_3 - a_2b_2).a_1/b_1} \qquad (5 -27)$$

ومن المعروف أنّ كل المواد المستخدمة في الأجهــزة الكهروحراريّــة فــي الوقــت الحاضر هي مواد نصف ناقلة معالجة كيميائياً وأداؤها يوصف من خلال خاصية مميــزة

الشكل (Figure of Merit) وتسمى أحياناً برقم الاستحقاق والتي يفضل أن تكون بقيمة مرتفعة ليعطي أداء جيداً للجهاز. هنا سنفرض النظام (الجهاز) الكهروحراري يعمل عند درجة حرارة الغرفة وهو ذو قيمة للمقدار ($Z.T_h=1$) عند إجراء التحليل، وبإعطاء بعض القيم للمقدار θ المعادلة (5 -25) يمكن أن نستخدمها لإنشاء العلاقة بين التيار الكهربائي اللابعدي ومعامل البناء الداخلي (X ~ j) كما يُرى في الشكل (5 - 3)، البرنامج التالي الذي كتب بلغة ***(MATLAB7.6)*** يبين كيفية الحصول على التمثيل البياني بين (X ~ j)، واعتماداً على تعريف معامل البناء الداخلي X والذي دائماً أكبر من الصفر، وحسب هذا الشرط المنطقة (X< 0) لم تمثل في الشكل (5- 3).



الشكل (5- 3) يبين علاقة معامل البناء الداخلي مع التيار الكهربائي اللابعدي عند معامل أداء أعظمي وقيمة للمقدار($Z.T_h=1$) و قيم θ المبينة في الشكل.

نرى في الشكل (5- 4) خطوات البرنامج الذي يرسم العلاقة البيانية بين المتغيرين.

```
function yaser
Z=1;
Th=1;
for i=1:3
    if i==1
    oh=1.1;
    j=0.0502:0.01:1.79;
    end
    if i==2
    oh=1.3
    j=0.155:0.01:1.4;
    end
    if i==3
    oh=1.5;
    j=0.287:0.01:1.15;
    end
a1=(j+1).^2-((j.^2.*(1+0.5*j))/(Z*Th))*oh-oh;
a2=(1+j).*(1-j)+(j.^2/(Z*Th)).*(0.5*j-1)*oh-1;
b1=((0.5*j/Z*Th)+(1/(Z*Th))+1).*j.^2*oh;
b2=((2.*j*oh/(Z*Th))+2*(oh-1)-j-j*oh).*j;
b3=j.^2.*(1+oh/(Z*Th)-0.5*j*oh/(Z*Th));
F=sqrt(a2.^2+(a1.*b3-a2.*b2).*a1./b1);
X=(F-a2)./a1;
plot(j,X)
ylim([0 8]);
hold on;
end
xlabel('j');
ylabel('X');
```

الشكل (5- 4) برنامج يرسم العلاقة بين التيار الكهربائي اللابعدي ومعامل البناء الداخلي.

نرى من الشكل (5- 3) عندما $X > 0$ يكون $j_{max} > j > j_{min}$ ، وحيث إنّ قيم j_{max} ، j_{min} موجودة في الجدول (5-2) والتي تستنتج من خلال المعادلة (5 -12)، وبوضوح نجد أن قيمة j_{min} تتزايد مع ازدياد θ بينما قيمة j_{max} تتناقص مع ازدياد θ، وعندما تكون نسبة درجات الحرارة مرتفعة يصبح المجال صغيراً بين j_{min} و j_{max}، ويمكن أن نرى من المنحنيات أيضاً أن X غير متناسبة طرداً مع j، من أجل بعض القيم المعطاة لـ θ ومن الشكل (5- 3) نجد أن القيمة الصغرى لـ X عند معامل أداء أعظمي نرمزها بـ $X_{min(\varepsilon)}$,...X تزداد مع ازدياد قيمة θ، قيم $X_{min(\varepsilon)}$ المطابقة للتيار الكهربائي اللابعدي $j_{\varepsilon\ (Xmin)}$ موضحّة في الجدول (5 - 2).

الجدول (5- 2) يعطي قيم التيار الكهربائي اللابعدي j ومعامل البناء الداخلي X عند قيمة $Z.T_h=1$.

θ	j_{min}	j_{max}	$j_{\varepsilon(Xmin)}$	$Xmin(\varepsilon)$	$j_{r\ (Xmin)}$	$Xmin(r)$
1.1	0.050	1.79	0.124	1.27	0.118	1.31
1.3	0.155	1.47	0.331	2.11	0.325	2.23
1.5	0.277	1.15	0.491	4.25	0.488	4.42

بتعويض المعادلة (25- 5) بالمعادلات (21- 5), (22- 5), (23- 5) نجد معامل الأداء للنظام:

$$COP = \frac{F}{2b_1(a_2/a_1)^2 + 2b_3 - 2a_2b_2/a_1 + (b_2 - 2a_2b_1/a_1)F/a_1} \qquad (5\text{-}28)$$

ونجد علاقة معدّل التبريد اللابعدي:

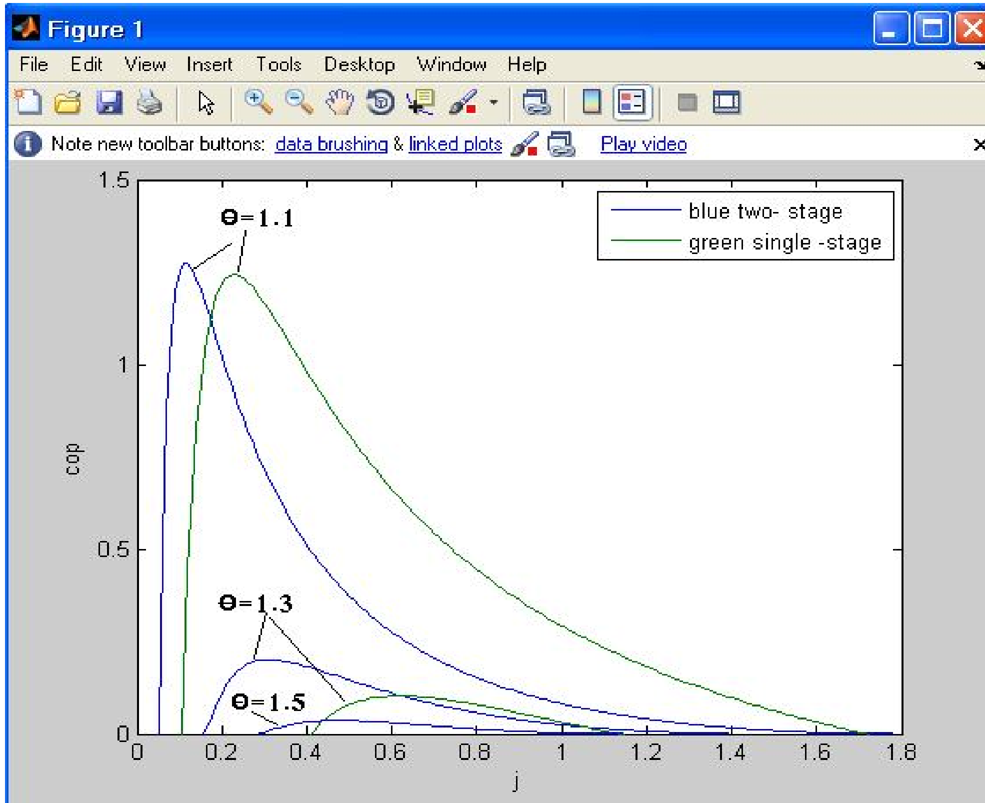
$$r = \frac{1}{\Theta}.\frac{F}{2f_1(a_2/a_1)^2 + f_1b_3/b_1 + f_3 - (f_1b_2/b_1 + f_2)a_2/a_1 + (f_2 - 2a_2f_1/a_1)F/a_1} \qquad (5 - 29)$$

وعلاقة طاقة الدخل اللابعديّة:

5 - 30)

$$p = \frac{1}{\Theta}.\frac{2b_1(a_2/a_1)^2 + 2b_3 - 2a_2b_2/a_1 + (b_2 - 2b_1a_2/a_1)F/a_1}{2f_1(a_2/a_1)^2 + f_1b_3/b_1 + f_3 - (f_1b_2/b_1 + f_2)a_2/a_1 + (f_2 - 2a_2f_1/a_1)F/a_1} ($$

باستخدام المعادلتين (5-6) و (5-28) يمكننا رسم منحني العلاقة بين (j~ cop) من أجل بعض القيم المفروضة لـــلمقدار θ ونرى هذا في الشكل (5- 5).



الشكل (5- 5) يبين العلاقة بين cop معامل الأداء والتيار الكهربائي اللابعدي j عند قيمة للمقدار ($Z.T_h$=1) وبعض القيم المعطاة لــ θ وحيث أنّ الخط الأزرق للمبرّد الثنائي والأخضر للمبرّد الأحادي.

البرنامج التالي في الشكل (5- 6) يبين كيفية الحصول على التمثيل البيـاني بـين معامل الأداء والتيار الكهربائي اللابعدي والذي كتب بلغة (*MATLAB7.6*):

```
function yaser2
Z=1;
Th=1;
for i=1:3
    if i==1
    oh=1.1;
    j=0.0502:0.01:1.79;
    end
    if i==2
    oh=1.3
    j=0.155:0.01:1.4;
    end
    if i==3
    oh=1.5;
    j=0.287:0.01:1.15;
    end
a1=(j+1).^2-((j.^2.*(1+0.5*j))/(Z*Th))*oh-oh;
a2=(1+j).*(1-j)+(j.^2/(Z*Th)).*(0.5*j-1)*oh-1;
b1=((0.5*j/Z*Th)+(1/(Z*Th))+1).*j.^2*oh;
b2=((2.*j*oh/(Z*Th))+2*(oh-1)-j-j*oh).*j;
b3=j.^2.*(1+oh/(Z*Th)-0.5*j*oh/(Z*Th));
F=sqrt(a2.^2+(a1.*b3-a2.*b2).*a1./b1);
cop1=F./(2*b1.*(a2./a1).^2+2*b3-2*a2.*b2./a1+((b2-2*a2.*b1./a1).*(F./a1)));
cop2=(j-(oh*j.^2/(2*Z*Th))+(1-oh))./((oh-1)*j+oh*j.*j/(Z*Th));
plot(j,cop1,j,cop2)
ylim([0 1.5]);
hold on;
end
xlabel('j');
ylabel('cop');
legend({'blue two- stage','green single -stage'});
```

الشكل (5- 6) يبين البرنامج الذي يرسم العلاقة بين (cop ~ j) لنظامي التبريد.

حيث الخط الأزرق يمثل نظام المبرّد الثنائي الطبقات والخط الأخضر يمثل النظام الأحادي الطبقـة، فعنــد 1.5 =θ نجـد مــن خــلال الــشكل (5- 5) أنّ COP للمبـرّد الكهروحراري الأحادي الطبقة أصغر من الصفر، نستنتج أنّه عندما تكون نـسبة درجـة الحرارة بين الوصلة الساخنة والوصلة الباردة كبيرة يكون عمل المبـرّد الأحـادي غيـر مستقر، ونرى أيضاً أنّه عندما $COP = 0$ و $j = j_{min}$ أو $j = j_{max}$ يمكن أن نثبت بالحـساب العددي أنه في المبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات أنّ قيم j_{min} و j_{max} عنـد $COP = 0$ مماثلة لقيمها عند قيمة $X = 0$ الموضحة في الجدول (5-2)، ومن الشكل (5- 5) نـرى أنّ بإعطاء قيم لــلمقدار θ هناك قيمة أعظميّة لـــ COP لنظــام التبريــد الكهروحــراري، والجدول (5- 3) يعطي القيم الأعظميّة لـ COPs والمطابقة لمعامل البناء الداخلي لنظــام المبرّد الكهروحراري الثنائي التي تستنتج من المخططات البيانيّــة ذوات الأرقــام (5- 5) بالنسبة لـــ cop_{max} و(5- 3) بالنسبة لـــ X_{ε} و(5-7) بالنسبة لـــ Xr و (5- 10) لقيم r_{max}.

الجدول (5- 3) يعطي قيم معامل الأداء cop_{max} ومعدّل التبريد اللابعديّ r_{max} والموافقة لمعامل البناء الداخلي Xε و Xr عند قيمة $(Z.T_h=1)$.

نسبة T_h / T_c	قيمة معامل الأداء لأعظميّة	قيمة معامل البناء الداخلي عند قيمة أعظميّة لمعامل الأداء	معدّل التبريد اللابعدي الأعظمي	قيمة معامل البناء الداخلي عند قيمة أعظميّة لمعدّل التبريد
θ	cop_{max}	X ε	r_{max}	Xr
1.1	1.28	1.27	0.106	2.00
1.3	0.201	2.12	0.0472	2.72
1.5	0.0365	4.26	0.0140	4.76

ويمكن أن نجد من الجدولين (5- 2), (5- 3) أنّ قيمة Xε معامل البناء الداخلي عند COP أعظمي هي مقاربة تماماً لقيمة $X_{min(\varepsilon)}$ (قيمة معامل البناء الداخلي الصغرى عند قيمة أعظمية لمعامل الأداء) وإنّ COP_{max} يتناقص مع ازدياد θ، ونستطيع أن نجد أيضاً من الحسابات الأولية أن COP_{max} لنظام التبريد الثنائي الكهروحراري هو دائماً أكبر منه لنظام المبرّد الكهروحراري الأحادي عند العمل بنفس الفارق الحراري، الاختلاف بينهما يزداد مع ازدياد النسبة θ، فمثلاً من خلال المنحنيات عندما θ =1.1 فإنّ COPs الأعظميّة لنظامي التبريد تساوي على الترتيب الثنائي يساوي 1.28 والأحادي يساوي 1.24 أي الفارق بينهما 0.04، وعندما θ =1.3 فإنّ قيم COPs الأعظميّة للنظامين على التوالي 0.201 , 0.102 وهنا الفارق بينهما 0.099، وعندما θ = 1.5 فإنّ معامل الأداء للمبرّد الكهروحراري الأحادي الطبقة يكون أصغر من الصفر، وفي مثل هذه الحالة تظهر أفضليّة استخدام نظام تبريد كهروحراري الثنائي.

5- 5 - مميزات الأداء عند معدّل تبريد أعظمي

Performance Characteristics at Maximum Rate of Cooling:

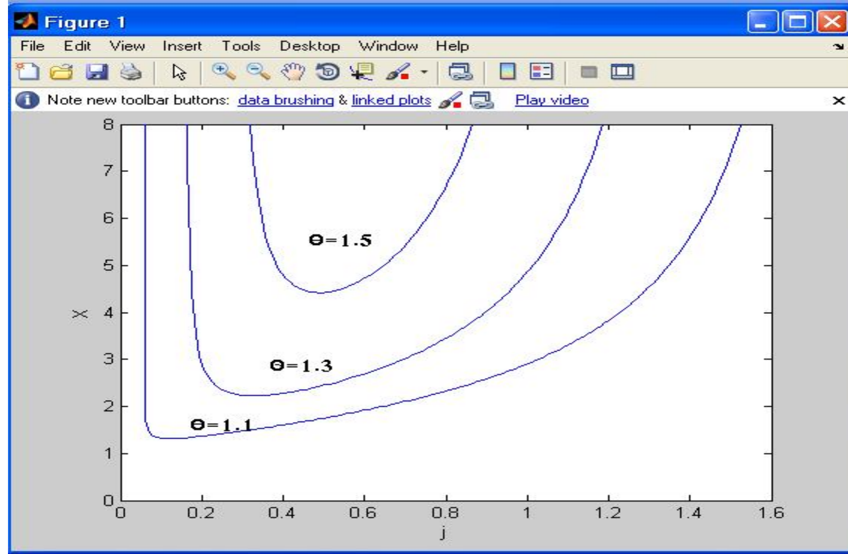
بالطريقة نفسها يمكن أن نناقش مميزات الأداء للمبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات عند معدّل تبريد أعظمي، باستخدام المعادلة (5- 22) والشروط الحدية نجد أنّه عندما:

$$X = (G_0 - a_2)/a_1 \quad (5\text{-}30)$$

فإنّ معدّل التبريد اللابعدي يبلغ قيمة أعظميّة وحيث G_0:

$$G_0 = \sqrt{a_2^2 + (a_1 f_3 - a_2 f_2) a_1 / f_1} \quad (5\text{-}31)$$

ومن أجل بعض القيم المعطاة للمقدار θ المعادلة (5- 30) تستخدم لإنشاء العلاقة بين (X~j) التي تظهر في الشكل (5-7). والبرنامج الموضّح في الشكل (5 - 8) يبين كيفية الحصول على التمثيل البياني والذي كتب بلغة (***MATLAB 7.6***).



الشكل (5–7) يبين العلاقة بين معامل البناء الداخلي والتيار الكهربائي اللابعدي عند سعة تبريد أعظميّة وقيمة للمقدار($Z.T_h$= 1) وبعض القيم المفروضة لـــ θ الموضحة بالشكل.

نرى أنّ هذا الشكل مشابه للشكل (5- 3) فيه قيم j_{min}، j_{max} هي نفسها في الشكل (5- 3) وهو متوقع لأنّ COP يساوي الصفر عندما $r = 0$ من أجل بعض القيم المعطاة لـــ θ وهناك أيضاً قيمة صغرى لمعامل البناء الداخلي عند قيمة أعظميّة لمعدّل التبريد التـــي نرمزها بـــ$X_{min}(r)$ ..X، ونجد قيم $X_{min}(r)$ والمطابقة للتيار الكهربائي اللابعدي $j_{r\ (X\ min)}$ هي أيضاً موضّحة في الجدول (5 - 2)، ونرى من خلاله أنّ قيم $X_{min}(r)$ هـــي مختلفة عن قيم $X_{min}(\varepsilon)$ لكن الاختلاف بينهما صغير جداً.

```
function yasser3
Z=1;
Th=1;
for i=1:3
    if i==1
    oh=1.1;
    j=0.0502:0.01:1.79;
    end
    if i==2
    oh=1.3
    j=0.155:0.01:1.4;
    end
    if i==3
    oh=1.5;
    j=0.287:0.01:1.15;
    end
a1=(j+1).^2-((j.^2.*(1+0.5*j))/(Z*Th))*oh-oh;
a2=(1+j).*(1-j)+(j.^2/(Z*Th)).*(0.5*j-1)*oh-1;
f1=1+j;
f2=2;
f3=1-j;
G=sqrt(a2.^2+(a1.*f3-a2.*f2).*a1./f1);
X=(G-a2)./a1;
plot(j,X)
ylim([0 8]);
hold on;
end
xlabel('j');
ylabel('X');
```

الشكل (5 - 8) يبين البرنامج الذي يرسم العلاقة بين (X ~ j) وذلك عند معدّل تبريد أعظمي.

وبتعويض المعادلـــة (30 -5) فـــي المعـــادلات (21 -5) و (22 -5) و(23 -5) نستنتج علاقة معامل الأداء للنظام:

$$COP = \frac{G_0}{2b_1(a_2/a_1)^2 + 2b_3 - 2a_2b_2/a_1 + (b_2 - 2a_2b_1/a_1)G_0/a_1} \qquad (5\text{-}32)$$

وعلاقة معدّل التبريد اللابعدي للنظام:

$$r = \frac{1}{\Theta}\cdot\frac{G_0}{2f_1(a_2/a_1)^2 + f_1b_3/b_1 + f_3 - (f_1b_2/b_1 + f_2)a_2/a_1 + (f_2 - 2a_2f_1/a_1)G_0/a_1} \qquad (5\text{-}33)$$

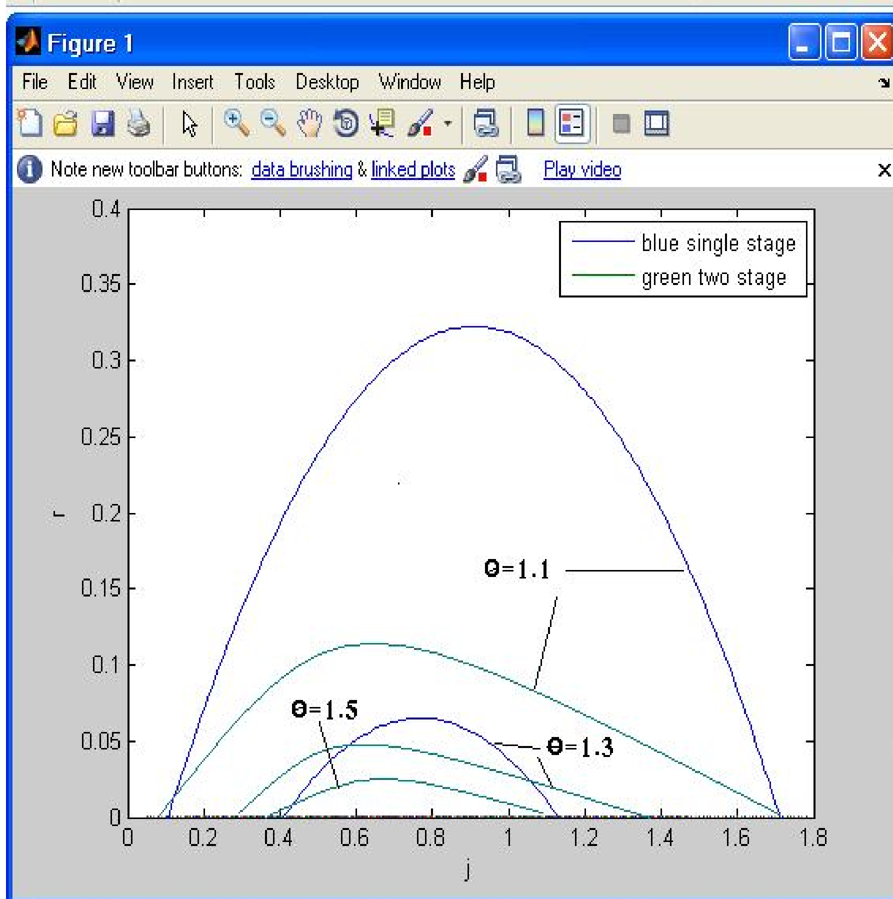
وعلى علاقة طاقة الدخل اللابعديّة: (34 -5)

$$p = \frac{1}{\Theta}\cdot\frac{2b_1(a_2/a_1)^2 + 2b_3 - 2a_2b_2/a_1 + (b_2 - 2b_1a_2/a_1)G_0/a_1}{2f_1(a_2/a_1)^2 + f_1b_3/b_1 + f_3 - (f_1b_2/b_1 + f_2)a_2/a_1 + (f_2 - 2a_2f_1/a_1)G_0/a_1}$$

وباستخدام المعادلة (7 -5) والمعادلة (33 -5) يمكن أن نرسم المخطط $(r \sim j)$ من أجل بعض القيم المعطاة لـــ θ { الشكل (10 -5)} حيث يمثل المنحني الأخـــضر المبـــرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات والمنحني الأزرق المبرّد الأحادي الطبقة.ويمكن الحـــصول على التمثيل البياني بواسطة البرنامج التالي الواضح في الشكل (5 - 9):

```
function yasser4
Z=1;
Th=1;
for i=1:3
    if i==1
    oh=1.1;
    j=0.0502:0.01:1.79;
    end
    if i==2
    oh=1.3;
    j=0.155:0.01:1.47;
    end
    if i==3
    oh=1.5;
    j=0.277:0.01:1.15;
    end
a1=(j+1).^2-((j.^2.*(1+0.5*j))/(Z*Th))*oh-oh;
a2=(1+j).*(1-j)+(j.^2/(Z*Th)).*(0.5*j-1)*oh-1;
b1=((0.5*j/(Z*Th))+(1/(Z*Th))+1).*j.^2*oh;
b2=((2.*j*oh/(Z*Th))+2*(oh-1)-j-j*oh).*j;
b3=j.^2.*(1+oh/(Z*Th)-0.5*j*oh/(Z*Th));
f1=1+j;
f2=2;
f3=1-j;
G=sqrt(a2.^2+(a1.*f3-a2*f2).*a1./f1);
r2=(1/oh).*G/(2*f1.*(a2./a1).^2+(f1.*b3./b1)+f3-((f1.*b2./b1)+f2).*a2./a1+(f2-2*a2.*f1./a1).*G./a1)
r1=(j/oh-(j.^2/2*Z*Th)+(-1+1/oh));
plot(j,r1,j,r2)
ylim([0,0.4]);
hold on;
end
xlabel('j')
ylabel('r')
```

الشكل (9 -5) يبين البرنامج الذي يرسم العلاقة بين (r ~ j) وذلك عند معدّل تبريد أعظمي .



الشكل (5- 10) يبين العلاقة بين معدّل التبريد اللابعدي والتيار الكهربائي اللابعدي لنظامي التبريد عند معدّل تبريد أعظمي و $Z.T_h = 1$ وقيم θ المبينة بالشكل.

من الشكل (5- 10) نجد أنّه توجد قيمة أعظمية لمعدّل التبريد الأعظمي اللابعدي لنظام التبريد الكهروحراري، والجدول (5 - 3) يبين القيم الأعظميّة لـــ r_{max} أي لمعدّل التبريد اللابعدي والمطابق لمعامل البناء الداخلي X_r لنظام مبرّد كهروحراري ثنائي الطبقات، يمكن أن نجد من الجدولين (5- 2) و (5- 3) أنّ قيمة X_r عند معدّل تبريد أعظمي للمبرّد هي أكبر منها من $X_{min(r)}$ والاختلاف بينهما يتناقص مع ازدياد θ.

نرى أيضاً من الشكل (5- 10) أنّه عند نسبة درجة حرارة الجهة الساخنة على الجهة الباردة صغيرة، فإنّ معدّل التبريد الأعظمي للمبرّد الكهروحراري الأحادي الطبقة يكون أكبر من قيمته لنظام المبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات اللذين يعملان عند نفس المجال الحراري، من جهة ثانية عندما نسبة درجة حرارة الجهة الساخنة على الجهة الباردة كبيرة فإنّ معدّل التبريد الأعظمي للمبرّد الكهروحراري الأحادي أصغر منه عند النظام الثنائي اللذين يعملان عند نفس المجال الحراري.

5-6- العلاقــة بين COP ومعدّل التبريــد

Relation between The COP and The Rate of Cooling:

هنا سنناقش المــشاكل المتعلقــة بالتــصميم والعمــل الأمثــل لنظــام المبــرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات، فباستخدام المعادلتين (21 -5) و (22 -5) يمكن أن نمثّــل بيانياً العلاقة بين ($r \sim COP$) الموضّحة في الشكل (11 -5)، والذي مثّل من أجل قيمتــين لمعامل البناء الداخلي هما ($X = 2.12$) و ($X = 2.72$) والمطابقة لقيم معامــل البنــاء الداخلي X عند COP ومعدّل تبريد r أعظميين.

ومن الواضــح مــن الــشكل (11-5) أنّ المنحنـــي ($r \sim cop$) لنظــام المبــرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات يقسم إلى ثلاث أقسام بثلاث حالات عمل وهي :

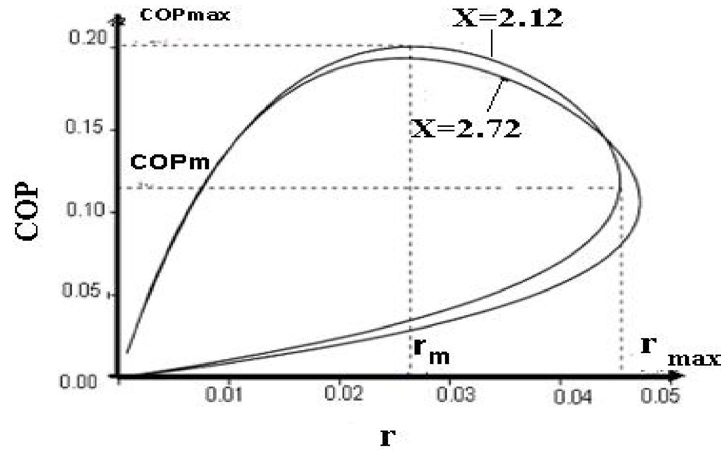
$cop = 0$, $cop = cop_m$ ، $cop = cop_{max}$، عندما يعمــل نظــام التبريــد الكهروحراري في المنطقة ذات الانحدار الموجب، هنا معدّل التبريد اللابعدي يتناقص مع تناقص COP وهذه المنطقة لا يرغب أن تكون منطقة عمل لنظام التبريد الكهروحــراري، وعندما يعمل نظام التبريد الكهروحراري في المنطقة ذات الانحدار السالب، فــإنّ معــدّل التبريد للمبرّد سيزداد إذا تناقص COP والعكس بالعكس، وهذه هي المنطقة المناسبة عملياً لعمل نظام التبريد الكهروحراري ومن ثم أنّ COP و معدّل التبريد اللابعدي لنظام التبريد يرغب بعملهما ضمن الشروط:

$$r_{max} \geq r \geq r_m \quad و \quad cop_m \leq cop \leq cop_{max} \qquad (5\text{-}35)$$

العوامــل (cop_{max} , cop_m , r_{max} , r_m) مهمّــة جــداً لنظــام التبريــد الكهروحراري، cop_m يمثل معامل الأداء عند قيمة أعظمية لمعدّل التبريد اللابعدي و r_m يمثّل معدّل التبريد اللابعدي عند قيمة أعظمية لمعامل الأداء، المعــاملان cop_{max} و r_{max} يعطيان الحدود العليا لــCOP ومعدّل التبريد اللابعــدي، بينمــا المعــاملان(ε_m ,r_m) يحددان الحدود الدنيا للقيم المثلى لــ COP ومعدّل التبريد الأعظمي اللابعدي، من خــلال الشكل (11-5) نرى قيمتين مختلفتين للمعامل X عنــد COP ومعــدّل تبريــد أعظميــين، الاختلاف بين المنحنيين ليس كبيراً. وفي التصميم المثالي فإنّ معامل البنــاء الــداخلي X يفضل أن يكون ضمن المجال:

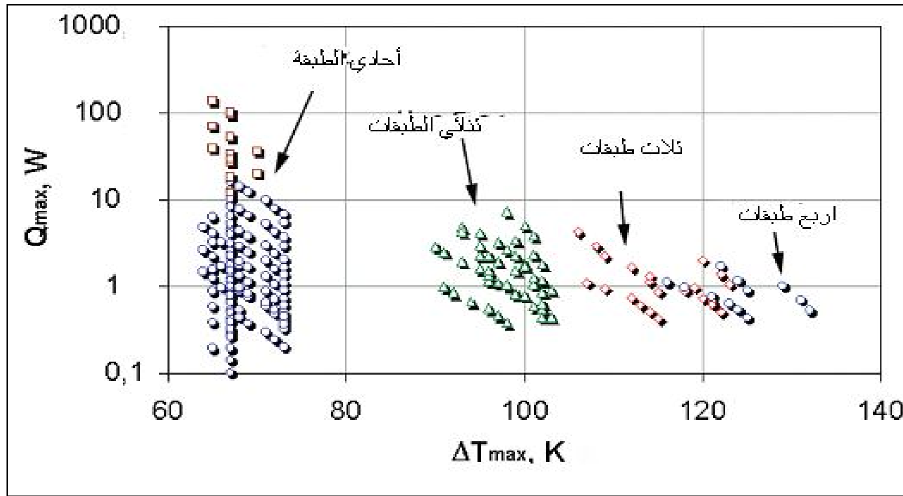
$$X_{\varepsilon} \prec X \prec X_r \qquad (5\text{-}36)$$

حيث أنّ منحنيات (r ~ cop) لنظام التبريد الكهروحراري تقع في المنطقة بين المنحنيين التي ترى في الشكل (5- 11)، ثم إنّ المعادلة (36- 5) يمكن أن تقودنا للتصميم المثالي لنظام التبريد الثنائي الطبقات .



الشكل (5-11) يمثّل العلاقة بين COP معامل الأداء و r معدّل التبريد عند قيمة للمقدارين ($Z.T_h$=1) و 1,3 = θ) للمنحنيات الممثلة و قيمتي معامل البناء الداخلي (X=2.12, X=2.72).

بيانياً يمكن أنّ نوضح علاقة عدد طبقات النظـام الكهروحـراري مـع الفـارق الحراري الذي يمكن أنّ يحققه النظام في الشكل (5- 12) [6].



الشكل (5- 12) يبين علاقة ($Q_{max} \sim \Delta T_{max}$) لنظام تبريد كهروحراري حسب عدد طبقات النظام من المواد شبه الموصلة.

الفصل السّادس

محاكاة أداء نظام ضخ حراري كهروحراري (مضخة كهروحراريّة)

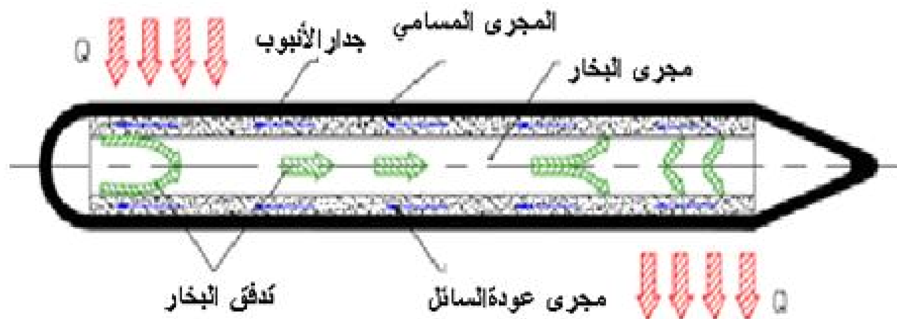
Performance Simulation of Thermoelectric Heat Pump System

6-1- مقدمة Introduction:

تم هنا بناء نموذج رياضي حاسوبي مطوّر لمحاكاة أداء نظام ضخ حراري كهروحراري، عمليّة النمذجة تمت على أساس محاكاة نموذج مخبري بني وصمم في أحّد المختبرات العلمية التابعة لإحدى الجامعات البريطانية (University of Nottingham) [12] وتمت عملية النمذجة بحيث يعمل النموذج الحاسوبي تحت نفس شروط العمل التي يعمل بها جهاز التجربة المخبري لإعطاء عملية مقارنة النتائج دقة مقبولة علمياً بين القيم التي تم الحصول عليها بواسطة النموذج الحاسوبي المصمم والقيم التجريبية للنموذج الأصلي المخبري، في هذا النظام الهجين (Hybrid System) دُرست طريقة دمج تقنية الكهروحراريّة مع خصائص الدّارة الانضغاطيّة في نظام متكامل من خلال تقنية الديود الحراري (Thermal Diode) لتشكيل نظام ضخ حراري مترابط في العمل ومتكامل في الأداء كاتجاه جديد في سبيل تحسين أداء وزيادة فعاليّة الأجهزة الكهروحراريّة.

6-2- الأنابيب الحراريّة The Heat Pipes:

بما أننا نستخدم الأنابيب الحراريّة في العمل، نقدم فكرة بسيطة عنها، الأنبوب الحراري كما يظهر في الشكل (6 -1) الذي يبين آلية عمله المعروفة بالقدرة على نقل الحرارة بكميات كبيرة من قسم المبخّر إلى قسم المكثّف ليتم تكثيف البخار وطرح الحرارة ومن ثم العودة إلى المبخّر عبر خاصية الأنابيب الشعريّة (Capillary Type) بواسطة الثقّالة.



الشكل (6 - 1) يبين مكونات الأنبوب الحراري.

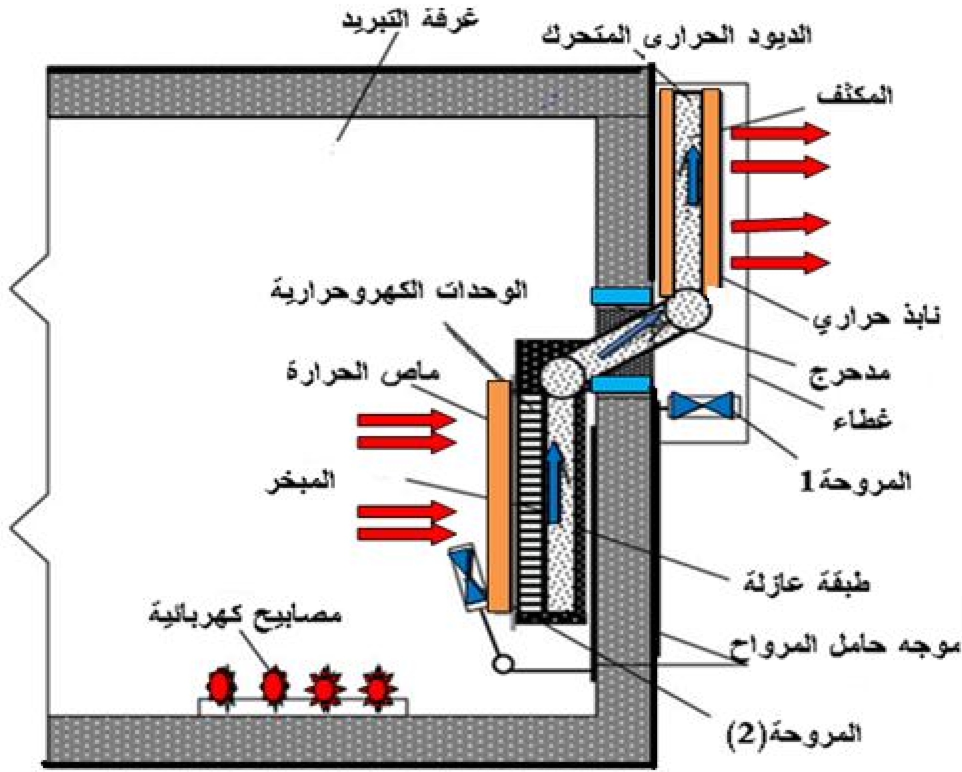
6- 3- نظام الضخ الحراري Description of The Heat Pump System:

6- 3-1- عمل نظام الضخ الحراري Heat Pump and its Operation:

نظام الضخ الحراري الكهروحراري مؤلف من ترابط الوحــدات الكهروحراريّــة مع الديود الحراري المتحرّك المــسطح (Cranked Flat Thermal Diode) فــي وحــدة متكاملة كما يظهر في الشكل (6- 2 -A)، وحيث إنّ الديود الحراري المتحرك مكوّن مــن قسمي المبخّر والمكثّف المستويي الشكل (إنّ آليّة عمل الديود الحراري تتمثّل بأنّه في حالة ضعف الطاقة (Power Failure) يصبح النظام غير قادر على مقاومة الضياعات الناتجــة عن التسرب الحراري في الخلايا الكهروحراريّة من الجهة الساخنة إلى الجهــة البــاردة، يقوم الديود الحراري هنا كمثل (Thermosyphone) بين الجهة البــاردة للنظــام والخلايــا الكهروحراريّة مانعاً الانتقال الحراري في الاتجاه المعاكس، أي يسمح باتجاه عبور واحــد من المبخّر إلى المكثّف)، والوحدات الكهروحراريّة مترابطة علــى التسلــسل ومتوضّــعة بجانب بعضها البعض على السطح الجانبي للديود الحراري، محشوة بينــه وبــين مــاص الحرارة والذي يستخدم للمساعدة في عملية تشتيت الحرارة، هناك مروحة للمــساعدة فــي تشكيل تيار هوائي، وفي النموذج الحاسوبي نستخدم مصابيح ضــوئية لمحاكــاة الحمــل الحراري في حالة محاكاة التبريد ونستخدم مروحة صغيرة متوضّعة على جــدار العلبــة للدلالة على الضياعات الحراريّة في حالة محاكاة التسخين، أمّا عمل نظام الضخ الحراري فيكون كالتالي:

- **حالة التبريد:**

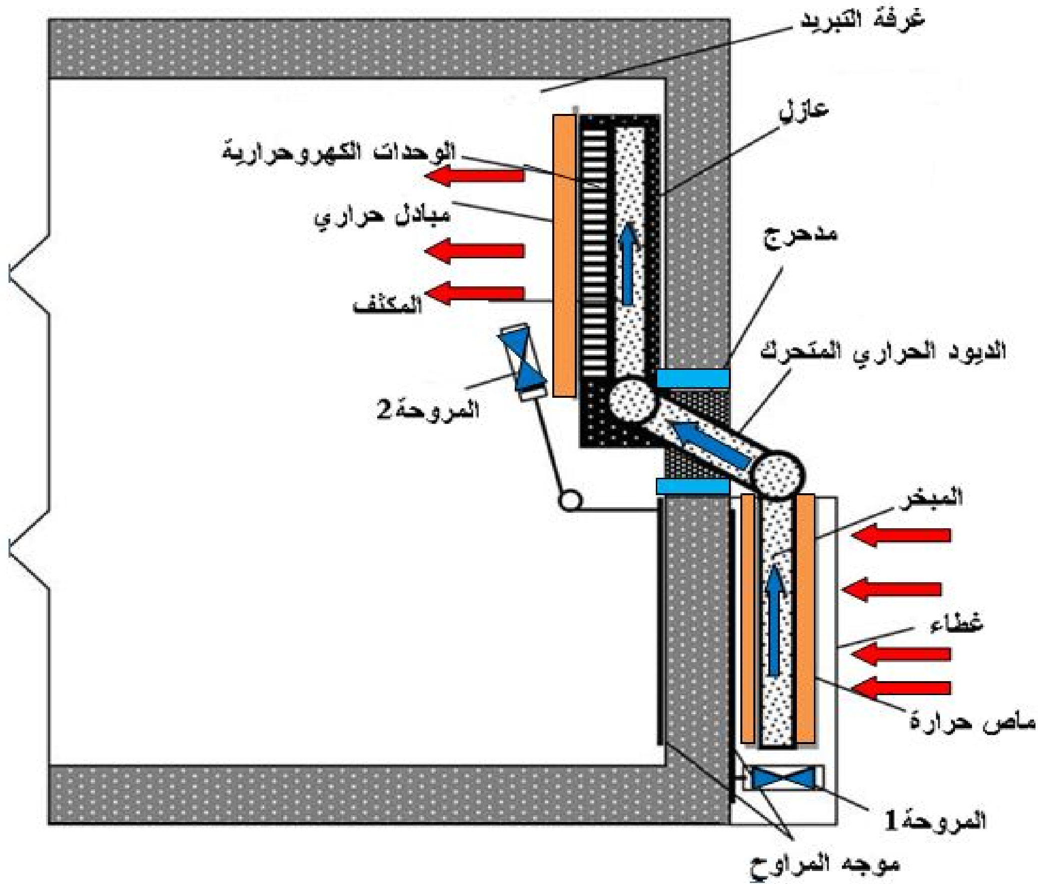
المستخدم صيفاً، كمية الحرارة Q_c المسحوبة من غرفة التبريــد والظــاهرة علــى القسم المتصل بالوحدات الكهروحراريّة من الجهة الباردة (ماص الحرارة) ليتم توصــيلها إلى الجهة الساخنة، بينما كمية الحرارة Q_h الناتجة على الجهة الساخنة تتــضمن مجمــوع (P و Q_c) حيث P هو مقدار الاستهلاك الطاقي من قبل النظام (الوحــدات الكهروحراريّــة والمراوح)، وكمية الحرارة Q_h تسبب جريان وسيط العمل داخل الديود الحــراري بعــد رفع درجة حرارته وتبخيره ليتدفق البخار حاملاً معه الحرارة من قسم المبخّر نحو قــسم المكثّف المتوضّع في الخارج (خارج غرفة التبريد)، حيث يتم تكثيف وسيط العمل وطرح الحرارة إلى الوسط الخارجي عبر نابذ الحرارة {الشكل (6 - 2 – A)}.



الشكل (6- 2- A) يبين تركيبة النظام بحالة التبريد.

حالة التسخين:

شتاءً هنا الديود الحراري يتوجب قلبه (دورانه حول محوره) لعكس آلية العمل (قلب تموضع قسمي المبخّر والمكثّف داخل غرفة التجربة) ليتلائم مع وظيفة التسخين لغرفة التجربة كما هو واضح في الشكل (6 - 2- b)، وهنا كمية الحرارة Q_c تُنتزع من الوسط الخارجي عبر قسم المبخّر(المتوضّع خارجاً) وتسبب جريان وسيط العمل بعد رفع درجة حرارته وتبخيره، حيث يتدفق البخار من قسم المبخّر الخارجي إلى قسم المكثّف المتوضّع داخل الغرفة حيث يتكاثف وسيط العمل ويطرح كمية الحرارة المحمولة للجهة الباردة للوحدات الكهروحراريّة التي بدورها تطرحها للداخل بواسطة مبادل حراري ومروحة داخلية، وحيث أنّ كمية الحرارة Q_c توصل من الجهة الباردة إلى الجهة الساخنة ثم للداخل وكمية الحرارة Q_h على الجهة الساخنة تتضمن مجموع (Q_c و P) وحيث أنّ P مقدار الاستهلاك الطاقي، علماً أنّ كمية الحرارة Q_h تطرح لداخل الغرفة بواسطة نابذ الحرارة {الشكل (6 - 2- b)}، ومع ملاحظة أنّ الديود الحراري يمكن أنّ يعمل فقط في اتجاه واحد ويمكن أنّ يحول دون عكس اتجاه التدفق الحراري في حالة ضعف الطاقة.



الشكل (6 - 2- b) يبين تركيبة النظام بحالة التسخين.

6- 3- 2 مكوّنات نظام النموذج الأصلي Parts of The Prototype System:

- ***الديود الحراري Thermal Diode :***

يتألف من مبخّر ومكثّف مسطحين أبعادهمـــا (320 mm x 150 mm x 15 mm) مع 11 ثقب دائري بقطر 10 mm داخل الصفيحة المسطحة، الثقوب متصلة كل واحد مـــع الآخر عند النهايات للحفاظ على مستوى واحد لوسيط العمـــل الـــداخلي ضـــمن الـــديود الحراري، والقسم الأدياباتي ذو مقطع دائري بقطر mm ø 50 وبطول 120 mm، علمـــاً أنّ سعة الحرارة المنقولة W 940 عند درجة حرارة عمل 45 ^{0}C فـــي حالـــة محاكـــاة التبريد، وتبلغ 630 W عند درجة حرارة عمل 5 ^{0}C في حالة محاكاة التسخين.

- ***الوحدات الكهروحراريّة Thermoelectric Modules:***

هي من طراز{ (CP2 -127- 06)، من شركة MELCOR-USA } وعددها ثماني وحدات كهروحراريّة مترابطة على التسلسل حين الاستخدام، وهـــي بالمواصـــفات التالية حسب نشرات الشركة الصانعة [1].

الجدول (6 - 1) يبين مواصفات الوحدة الكهروحراريّة (CP2 -127- 06).

المعامل	واحدة القياس	القيمة	المعامل	واحدة القياس	القيمة
المادة الكهروحراريّة		Bi_2Te_3	التيار	A/couple	$1.86e^{+01}$
$_N\alpha = {_P\alpha}$	$V/^0C$	$\pm 2\ e^{-04}$	الكمون	V/couple	$1.51e^{-01}$
$_N\rho = {_P\rho}$	$\Omega \cdot m$	$1e^{-05}$	الطاقة	W	2.81
k	$W/m.^0C$	1.5	N_0 (couples)		127
A_P/A_N		1	R	ohm	$7.70\ e^{-03}$
$A_P = A_N$	m^2	$1.17\ e^{-05}$	K	$W/^0C$	$7.80\ e^{-03}$
$D_N = D_P$	m	0.0039	$\|\alpha\|$	$V/^0C$	$4\ e^{-04}$
$L_P = L_N$	m	$4.49\ e^{-03}$			

6- 4- نظريّة (فكرة) النموذج الحاسوبي Theory of The Computer Model:

6- 4-1- النموذج الرياضي Mathematical Model:

إنّ العلاقات التي تربط بين المتغيرات المختلفة الناظمة للنموذج الرياضي هي:

- معادلات التوازن الحراري الممثّلة لماص الحرارة الداخلي:

- حالة التبريد:

$$(6\ \text{-}1)\quad Q_C = \frac{T_{in} - T_C}{R_C} \Rightarrow T_C = T_{in} - Q_C.R_C$$

وحيث أنّ T_c و T_{in} هما درجة حرارة الجهة البـــاردة للوحـــدة الكهروحراريّـــة ودرجـــة الحرارة الداخلية لغرفة التبريد على التوالي.

- حالة التسخين:

$$Q_h = \frac{T_h - T_{in}}{R_C} \Rightarrow T_h = T_{in} + Q_h.R_C \qquad (6\ \text{-}2)$$

وحيث أنّ T_h, Q_h درجة حرارة والحمل الحراري للجهـــة الـــساخنة للوحـــدة الكهروحراريّة على التوالي.

- درجة الحرارة المتوسطة للجهتين الباردة والساخنة للوحدات الكهروحراريّة تعطى بالعلاقة:

$$T_m = \frac{T_h + T_C}{2} \qquad (6\ \text{-}3)$$

والفارق الحراري بين الجهتين الباردة والساخنة للوحدات الكهروحراريّة يحسب:

$$\Delta T = T_h - T_C \qquad (6\ \text{-}4)$$

- معادلات التوازن الحراري الممثّلة للديود الحراري وماص الحرارة الخارجي:

- حالة التبريد:

$$Q_h = (T_h - T_a)/(R_h + R_{hp}) \qquad (6\ \text{-}5)$$

حيث أنّ T_a و R_{hp} هما درجة حـــرارة

الوسط الخارجي والمقاومة الحرارية للديود الحراري على التوالي.

- حالة التسخين:

$$Q_c = (T_a - T_c)/(R_h + R_{hp}) \quad (6\text{-}6)$$

مع العلم أنّ قيمة ($R_c = 0.133655\ ^0C/W$) المقاومة الحرارية لماص الحرارة الداخلي عند سرعة هواء تساوي (1 m/s)، بينما قيمة ($R_h = 0.123681\ ^0C/W$) وهي المقاومة الحراريّة لماص الحرارة الخارجي عند سرعة هواء تساوي (2 m/s)، وعند التلامس الحراري بين سطوح التلامس في هذا النظام تم استخدام مادة الشحم الحراري عبر فيلم رقيق (طبقة رقيقة)، المقاومة الحراريّة لهذا الفيلم الرقيق من الشحم الحراري أخذت بالحسبان في الحسابات.

- الاستهلاك الطاقي للنظام يعطى بالعلاقة:

$$P = Q_h - Q_C \quad (6\text{-}7)$$

- معامل الأداء للنظام يحسب كما يلي:

- حالة التبريد:

$$COP = COP_1 = Q_c/P \quad (6\text{-}8)$$

- حالة التسخين:

$$COP = COP_1 = 1 + Q_c/P \quad (6\text{-}9)$$

- معامل سيبك للمواد الكهروحراريّة يعطى بالعلاقة:

$$\alpha = (a_0 + a_1 T_m + a_2 T_m^2).10^{-9} \quad (6\text{-}10)$$

$a_o = 22224.0$, $a_1 = 930.6$, $a_2 = -0.9905$

- تعطى علاقة المقاومة الكهربائيّة النوعيّة للمواد الكهروحراريّة كما يلي:

$$\rho = (p_0 + p_1 T_m + p_2 T_m^2).10^{-10} \quad (6\text{-}11)$$

$P_0 = 5112$ ، $P_1 = 163.4$ ، $P_2 = 0.6279$

- تعطى علاقة الإيصاليّة الحراريّة للمواد الكهروحراريّة كما يلي:

$$k = (k_0 + k_1 T_m + k_2 T_m^2).10^{-4} \quad (6\text{-}12)$$

$k_0 = 62605.0$ ، $k_1 = -277.7$ ، $k_2 = 0.4131$

- ويتم حساب التيار الكهربائي المستهلك من قبل النظام [12] من العلاقة :(13 -6)

$$I = (2.N.\alpha.T_C - \sqrt{(2N.\alpha.T_C)^2 - 4.N.\rho.(Q_C + 2.N.k.\Delta T.G)}/G/(2.N.\rho/G)$$

- ويحسب معامل الأداء للوحدات الكهروحراريّة كالتالي:

- حالة التبريد: (14 -6)

$$COP = COP_2 = \left[\alpha.I.T_C - k.G.\Delta T - I^2.\rho/(2.G)\right]/(I.^2\rho/G + \alpha.I.\Delta T)$$

- حالة التسخين: (15 -6)

$$COP = COP_2 = 1 + \left[\alpha.I.T_C - k.G.\Delta T - I^2.\rho/(2.G)\right]/(I^2.\rho/G + \alpha.I.\Delta T)$$

المعادلات (13– 6) و(14 -6) و(15 -6) تم الحصول عليها على أساس تحليلي لأداء الوحدات الكهروحراريّة، وأسس هذا التحليل على أساس التوازن الطاقي للضخ الحراري (حرارة بيلتيه وحرارة جول وحرارة التوصيل).

حيث أنّ حرارة بيلتيه المتدفقة (الحرارة التي تضخ عند الجهة الباردة بفعل بيلتيه في الوحدة الكهروحراريّة)، حرارة جول تقسم بنسبة % 50 لكل من الجهتين الباردة والساخنة، أمّا حرارة التوصيل – خلال العمل – فهي الحرارة التي يتم توصيلها من الجهة الباردة إلى الجهة الساخنة في الوحدة الكهروحراريّة خلال المادة الكهروحراريّة.

6- 4- 2- حساب المقاومات الحراريّة للديود الحراري

Calculation of Thermal Resistances of The Thermal Diode:

المعادلتان (5 -6) و (6 -6) تتطلبان حساب قيمة المقاومة الحراريّة للديود الحراري R_{hp} حيث يمكن حسابها من خلال برنامج فرعي في خوارزمية البرنامج العام، نظريّاً يتم حسابها من خلال التفصيل الآتي:

كمية الحرارة الناتجة على الجهة الساخنة (في حالة التبريد) أو كمية الحرارة الممتصة من الوسط الخارجي (في حالة التسخين) ستنتقل للخارج أو للداخل (الغرفة) من خلال عمليتي التبخير والتكثيف للوسيط العامل في الديود الحراري، هناك مقاومات حرارية متنوعة تظهر خلال العمل تضم الآتي: مقاومة جدار المبخّر، المقاومة المكافئة للوسيط العامل في المبخّر، مقاومة تدفق البخار، المقاومة المكافئة للوسيط العامل في المكثّف ومقاومة جدار المكثّف وهذه المقاومات [7] يمكن أنّ نعبر عنها بالشكل الآتي:

■ مقاومة جدار المبخّر Evaporator Wall Resistance:

$$R_{P,evap} = \frac{r_0^2 \ln(r_o/r_i)}{2L_e k_P} \quad (6-16)$$

حيث أنّ r_0 ، r_i، L_e، k_p هما نصف القطر الخارجي والداخلي لمقطع المبخّر في الأنبوب الحراري وطوله (m) والإيصاليّة الحراريّة لجدار الأنبوب الحراري $(W/m.^0C)$.

■ مقاومة Saturated Wick للمبخّر(طبقة رقيقة سائلة للأنبوب الحراري للفتيلة الخارجية):

$$R_{w,evap} = \frac{r_0^2 \ln(r_i/r_V)}{2L_e k_e} \quad (6-17)$$

حيث أنّ r_v، k_e نصف قطر عمود البخار في مقطع المبخّر للأنبوب الحراري والإيصاليّة الحراريّة للفراغ $(W/m.^0C)$.

■ مقاومة تدفق البخار Vapour Flow Resistance:

$$R_V = \frac{\pi . r_0^2 . F_V . T_V . (L_e/6 + L_a + L_C/6)}{\rho_V . J . \lambda} \quad (6-18)$$

حيث أنّ F_v, J, $\rho\lambda$, T_v, L_a, L_c, $_v$ هما معامل مقاومة الاحتكاك لتدفق البخار في الأنبوب الحراري ويساوي0.014، ودرجة الحرارة المطلقة لتدفق البخار وطول القسم الأدياباتي وطول مقطع المكثف في الأنبوب الحراري وكثافة تدفق البخار ومعامل التصحيح المتصل بالمقاومة الحراريّة لتدفق البخار ويساوي الواحد والحرارة الكامنة لوسيط التبريد (n-pentane) في الأنبوب الحراري J/ kg.

■ مقاومة الفتيلة المشبعة للمكثّف Condenser Saturated Wick (طبقة رقيقة سائلة للأنبوب الحراري للفتيلة الخارجية):

$$R_{w,cond} = \frac{r_0^2 \ln(r_{i,c}/r_{v,c})}{2L_c k_e} \quad (6-19)$$

حيث أنّ $r_{v,c}$ نصف قطر عمود البخار في مقطع المكثف في الأنبوب الحراري.

■ مقاومة جدار المكثّف Condenser Wall Resistance:

$$R_{P,cond} = \frac{r_0^2 \ln(r_{o,C}/r_{i,C})}{2L_C k_P} \quad (6-20)$$

■ المقاومة الكلية Total Resistance: (6 - 21)

$$R_{h,p} = R_{w,evap} + R_{P,evap} + R_v + R_{P,cond} + R_{w,cond}$$

وما يجب الإشارة إليه أنّ مقاومة التلامس بين الديود الحراري والنابذ الحراري أخذت بالحسبان عند حساب المقاومة الحراريّة للنابذ الحراري.

6- 5- طريقة الاختبار التجريبي Experimental Testing Method:

أنّ النموذج التجريبي صنع واختبر في غرفة ذات ظـروف محيطيـة مخبريـة، والذي يتكون من الديود الحراري وثماني وحدات من الوحدات الكهروحراريّة من النموذج (Type CP2 -127- 06)، وكل وحدة كهروحراريّة تحوي علـى 127 زوج كهرحـراري، وثلاثة أجهزة نبذ حراري ومروحتي تبريد AC كما هو موضح سابقاً، والنظـام يتوضّـع على إحدى جهتي جدار الغرفة ضمن غطاء معزول بأبعاد (1.22 m x 1.22 m x 1.22 m) ليحاكي غرفة أجراء الاختبار والتوضّع ضمن البيئة المطلوبة، وسيط التبريد المستخدم في الديود الحراري هو (n-Pentane)، وهو يعمل بمجال حراري ($20\ ^0C \div 120\ ^0C$ -) ويملأ أنابيب الديود حتى مستوى 0.3 m، وتكون الوحدات الكهروحراريّة مترابطة على التسلسل ومتوضّعة بجانب بعضها البعض على سطح الصفيحة المسطحة الأولى للديود الحـراري والمتوضّعة داخل الغرفة (المبخّر)، وهذه الوحدات محشوة بين الصفيحة المسطحة والنابذ الحراري (الذي يسمى النابذ الحراري الداخلي)، ويوجد أيضاً نابذان حراريان مزعنفـان (النابذان الخارجيان بزعانف ذات وضعية شاقولية) متوضّـعان علـى جهـة الـصفيحة المسطحة الأخرى للديود الحراري (المتوضّعة خـارج الغرفـة– المكثّـف)، الـتلامس الحراري بين الأسطح الحراريّة المتماسة يتم بفعاليّة باستخدام مادة الشحمة الحراريّة، كما أن مروحة التبريد الداخليّة متوضّعة داخل علبة أبعادهـا (120 mm x 120 mm x 38 mm) وتزود بتدفق هواء ($164\ m^3 / h = 0.04556 m^3/sec$) وتستهلك طاقة دخـل 22 W بينمـا المروحة الخارجيّة بأبعاد (172 mm x 151 mm x 51 mm) وبتدفق هـواء ($302\ m^3/ h$) أيّ ($0.08389\ m^3/sec$) وتستهلك طاقة 39 W، وخلال التجربـة يـتم ضـبط التـوتر الكهربائي المطلوب المستخدم لمراوح التبريد بغية الحصول على سرعة الهواء المطلوبة.

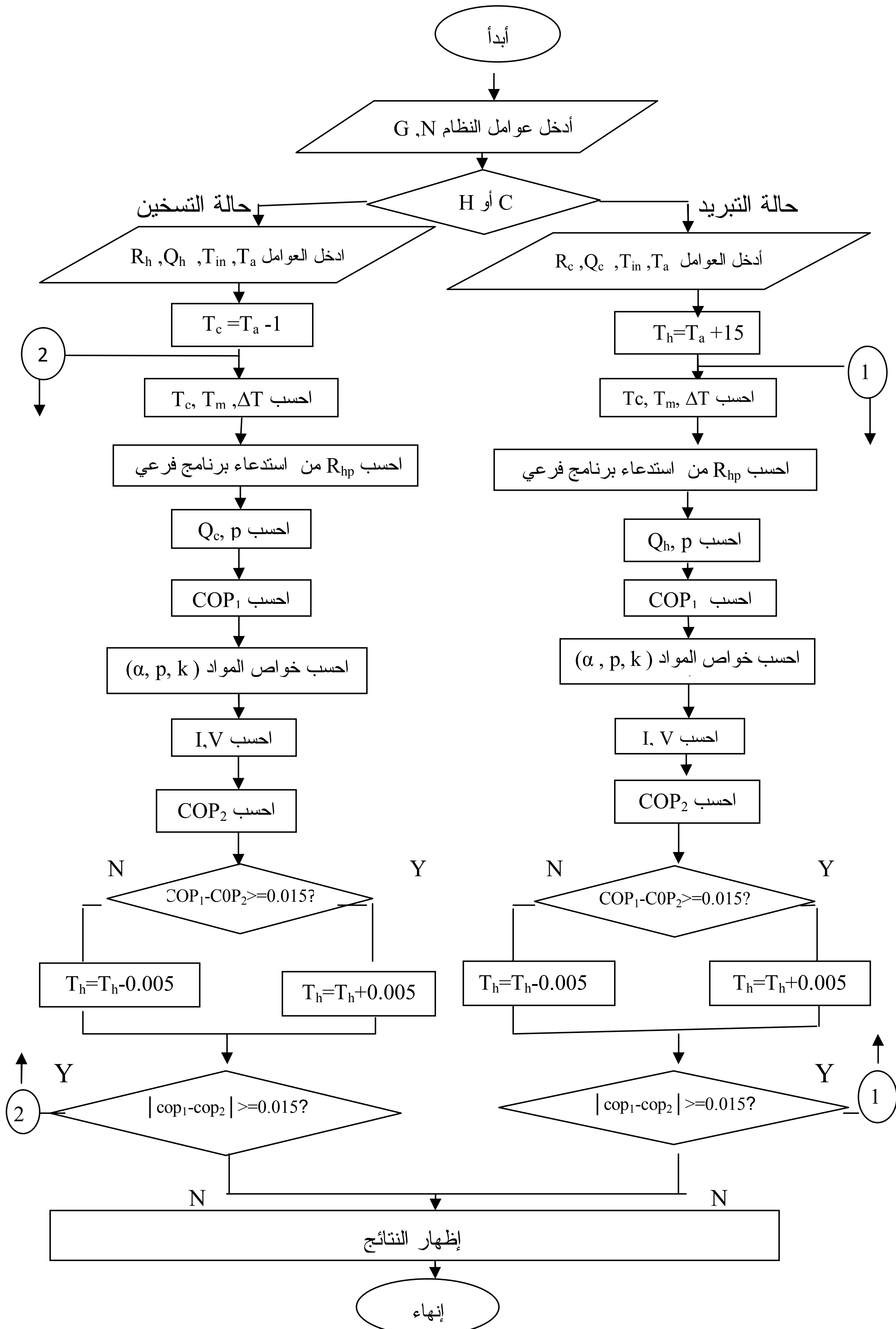
إنّ الاختبارات التي أجريت لمحاكاة التبريد (في حالة التبريد) أو محاكاة التـسخين (في حالة التسخين) داخل الغرفة المدروسة تمت عند شـروط عمـل ودرجـات حـرارة خارجية مختلفة، ففي حالة التبريد نستخدم مصابيح كهربائية لمحاكـاة الحمـل الحـراري وبقيم مختلفة (..25 W، 30 W،40 W)، أمّا في حالة التسخين فنستخدم مروحة صـغيرة متوضّعة على جدار العلبة للدلالة على الضياع الحراري، وكما قيـست درجـة الحـرارة

للوحدة الكهروحرارية عند شروط عمل مختلفة (T_c , T_h) ولقـسمي المبخّـر والمكثّـف للأنابيب الحرارية وداخل الغرفة والوسط المحيط.

تقييم أداء النظام المدروس تم بحساب COP الذي يحسب بنسبة الطاقة الممتصة أو المنبوذة داخل الغرفة المختبرة في حالتي التبريد أو التـسخين علـى الطاقـة الكهربائيـة المستهلكة من قبل الوحدات الكهروحراريّة وتجهيزات النظام، لتحقيق التوازن الحـراري في النظام فإنّ الطاقة التبريدية الناتجة في النظام مـساوية لمجمـوع الحمـل الحـراري والحرارة المنتقلة من الوسط الخارجي لداخل الغرفة عبر الجدران.

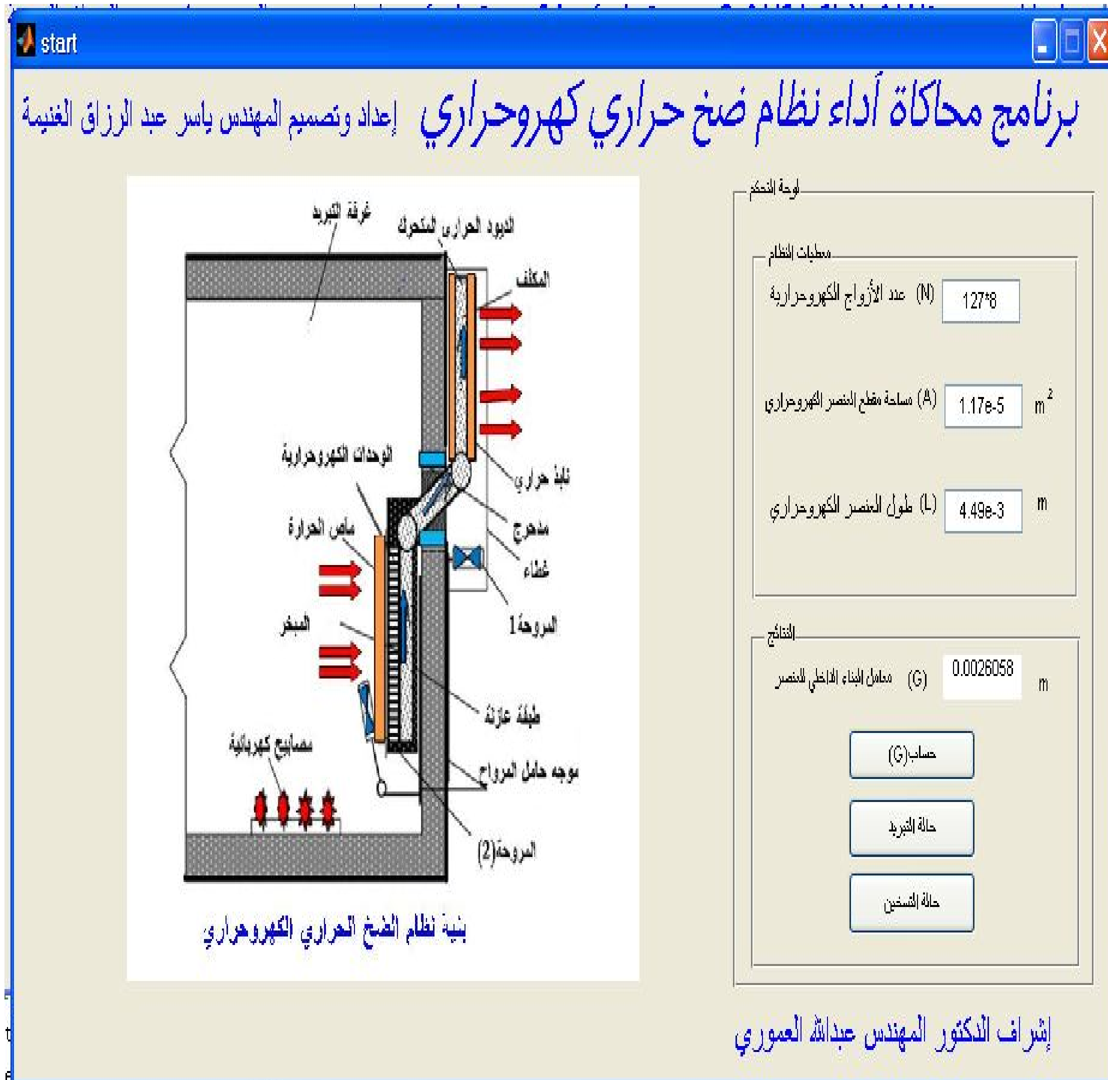
6- 6- بنية النموذج الحاسوبي Structure of The Computer Model:

لبناء الخوارزمية التي توضح سير عمل برنامج محاكاة أداء النظـام لـدينا القـيم المعلومة من أجل المحاكاة هي سعة التبريد Q_c في حالة التبريد والحرارة المنبوذة Q_h في حالة التسخين، ولدنيا درجة حرارة الغرفة الداخلية T_{in} ودرجة حرارة الوسط المحيط T_a، وهذه المعلومات غير كافية لحساب التيار الكهربائي أولحساب معامـل الأداء COP لكـن باستخدام المعادلات في الفقرة (6- 4-1) بشكل مباشر في النموذج الحاسوبي نستطيع بناء الخوارزمية الحاكمة للنظام ضمن دارة مغلقة في الشكل (6-3).


الشكل (3 - 6)
أبدأ
أدخل عوامل النظام G ,N
H أو C
حالة التسخين
حالة التبريد
ادخل العوامل Rh ,Qh ,Tin ,Ta
أدخل العوامل Rc ,Qc ,Tin ,Ta
Tc =Ta -1
Th=Ta +15
احسب Tc, Tm ,ΔT
احسب Tc, Tm, ΔT
احسب Rhp من استدعاء برنامج فرعي
احسب Qc, p
احسب Qh, p
احسب COP1
احسب خواص المواد (α, p, k)
احسب I,V
احسب COP2
COP1-COP2>=0.015?
N
Y
Th=Th-0.005
Th=Th+0.005
|cop1-cop2|>=0.015?
1
2
إظهار النتائج
إنهاء

6-7- تصميم البرنامج الحاسوبي Design of The Computer Program:

تم تصميم البرنامج الحاسوبي المستخدم (بلغة *MATLAB 7.6)* في عملية محاكاة أداء النظام الجديد، وذلك في حالتي التبريد والتسخين وبنفس الشروط المستخدمة في الاختبار التجريبي ويظهر الشكل (6- 4) الواجهة الرئيسيّة للبرنامج.



الشكل (6- 4) يبين الواجهة الرئيسية للبرنامج المصمم للمحاكاة.

يبين الشكل (6- 5) الواجهة الفرعية للبرنامج في حالة محاكاة حالة التبريد، حيث دُرست المحاكاة بالحالة الأولى بتغير كلّ من درجة حرارة الوسط الخارجي (المحيط) T_a ودرجة الحرارة الداخلية لغرفة التبريد T_{in}، كمية الحمل الحراري المزال من الغرفة Q_c وقيمة المقاومة الحراريّة لماص الحرارة الداخلي والتي تحسب حسابياً.

cooling
حالة تبريد
معطيات الحالة
درجة حرارة الوسط الخارجي (Ta) 24 °C
درجة حرارة الوسط الداخلي (Tin) 21 °C
الحمل الحراري عند الجهة الباردة (Qc) 25 W
المقاومة الحرارية لماص البرودة الداخلي (Rc) 0.133655 K / W
النتائج
احسب
درجة حرارة الجهة الباردة (Tc) 17.6586 °C
المقاومة الحرارية للأنبوب الحراري (Rhp) 0.0087985 m.² °C / W
الحمل الحراري عند الجهة الساخنة (Qh) 40.8742 W
معامل سيبك للمادة الكهروحرارية (a) 0.00021108 V / K
المقاومة النوعية للمادة الكهروحرارية (p) 1.0878e-005 Ohm.m
الإيصالية الحرارية للمادة الكهروحرارية (k) 1.6582 W / m.K
التيار الكهربائي المطبق (I) 1.0673 A
عامل الأداء للنظام (cop) 1.6618
رسم الخط البياني -2-
رسم الخط البياني -1-

الشكل (6 -5) يبين الواجهة الفرعية للبرنامج في حالة محاكاة التبريد.

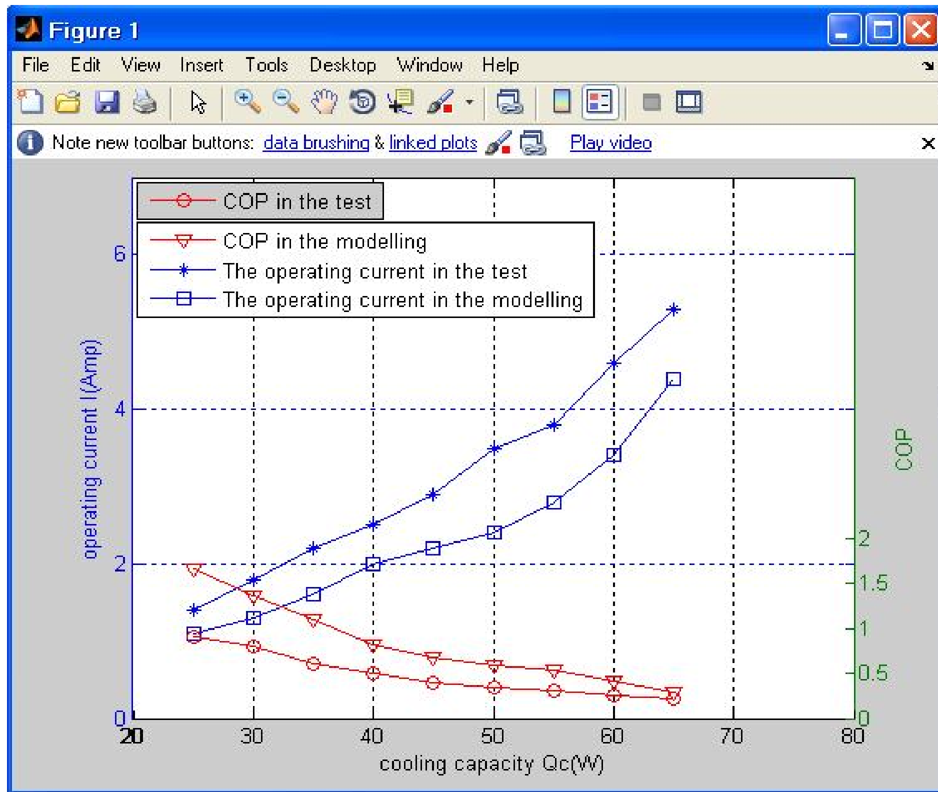
6-7-1- حالة التبريد Cooling Mode:

بواسطة البرنامج المصمم دُرِستْ **حالة** محاكاة التبريد عن طريق إدخال متغيرات الحالة المدروسة، وهي كمية الحرارة المزالة من الغرفة Q_c ولكن بثبات درجتي الحرارة الداخلية T_{in} والوسط المحيط T_a، وتسجيل النتائج في كل مرة (عدد الحالات المدروسة حوالي 10 حالات) في جدول لمقارنتها مع النتائج التجريبية التي أخذت من الاختبار التجريبي الذي أجري في أحد المختبرات العلمية بجامعة (University of Nottingham) البريطانية كما يُظهرها الجدول (6 - 2).

الجدول (6 - 2) يبين النتائج التجريبية وبجانبها قيم النمذجة- حالة التبريد- حالة أولى.

مسلسل	قيم ثابتة خلال التجربة ($T_{in} = 21\,^0C$ ، $T_a = 24\,^0C$)	قيم التيار الكهربائي المطبق {(I) ، A}		قيم معامل الأداء للنظام (COP)	
قيم الحمل الحراري (Qc, W)		النمذجة	التجربة	النمذجة	التجربة
1	20	0.87	1.2	1.99	0.95
2	25	1.1	1.4	1.66	0.9
3	30	1.3	1.7	1.4	0.8
4	35	1.6	2.1	1.1	0.6
5	40	2	2.4	0.8	0.5
6	45	2.3	2.8	0.65	0.4
7	50	2.4	3.4	0.7	0.35
8	55	2.8	3.7	0.55	0.3
9	60	3.4	4.6	0.41	0.25
10	65	4.5	5.3	0.26	0.25

يبين الشكل (6 -6) التمثيل البياني للنتائج التي تم الحصول عليها من خلال النمذجة والتجربة.



الشكل (6 -6) يبين مقارنة بين القيم النظريّة (النمذجة) والتجريبية لمعامل الأداء والتيار الكهربائي المطبق عند سعات تبريديّة مختلفة في حالة التبريد.

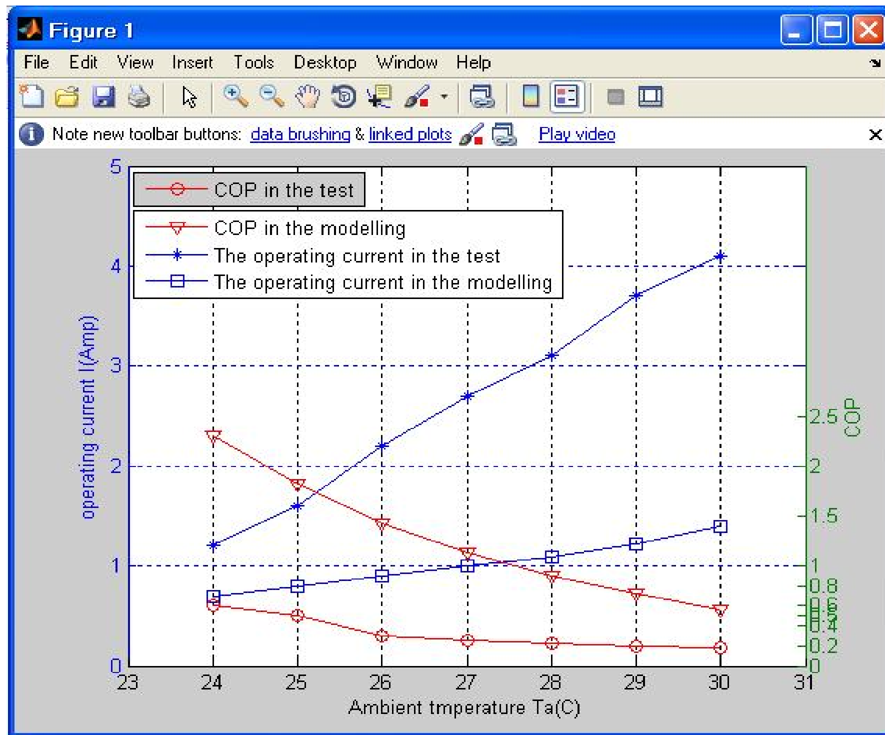
في **الحالة الثانية** المدروسة عند محاكاة التبريد هي دراسة التغيرات الحاصلة عند ثبات قيمة الحمل الحراري المزال Q_c ودرجة الحرارة الداخلية T_{in} مع تغير درجة حـــرارة

الوسط الخارجي T_a، بواسطة البرنامج المصمم لعملية النمذجة، تم تنظيم جـــدول للنتـــائج التي تم الحصول عليها من خلال النمذجة، الجدول (6 - 3).

الجدول (6 - 3) يبين قيم النمذجة والقيم التجريبية في حالة التبريد– حالة ثانية.

مسلسل	قيم ثابتة خلال التجربة ($T_{in} = 21\,^0C$ ،$Q_c = 15$ W)	قيم التيار الكهربائي المطبق {(I) ، A}		قيم معامل الأداء للنظام (COP)	
	قيم درجة حرارة الوسط الخارجي (T_a , ^0C)	النمذجة	التجربة	النمذجة	التجربة
1	23	0.6	1	3	0.7
2	24	0.7	1.2	2.3	0.6
3	25	0.8	1.6	1.8	0.5
4	26	0.9	2.2	1.4	0.3
5	27	1	2.6	1.13	0.25
6	28	1.1	3.1	0.9	0.25
7	29	1.3	3.7	0.7	0.20
8	30	1.5	4.1	0.6	0.18
9	31	2.2	4.4	0.3	0.16

وقد تم تمثيل النتائج الحاصلة في الجدول (6 - 3) بالشكل (6 - 7).



الشكل (6 - 7) يبين مقارنة بين القيم النظريّة (النمذجة) والتجريبية لمعامل الأداء والتيار الكهربائي المطبق عند تغير درجة حرارة الوسط الخارجي في حالة التبريد.

6-7 -2 حالة التسخين Heating Mode:

كما تم سابقاً بواسطة البرنامج المصمم دراسة حالة محاكاة التبريد، دُرست حالــة محاكاة التسخين عن طريق البرنامج المصمم الفرعي المبين في الشكل (6 - 8)، تــم ذلــك بإدخال متغيرات الحالة المدروسة وهي كمية الحرارة المدخلة إلى الغرفة Q_h ولكن بثبــات درجتي الحرارة الداخلية T_{in} والوسط الخارجي T_a، وتسجيل النتائج في كل مرة (عــدد الحالات المدروسة حوالي 10 حالات) في جدول لمقارنتها مــع النتــائج التجريبيــة كمــا يُظهرها الجدول (6- 4).

Heating

حالة تسخين

معطيات الحالة

درجة حرارة الوسط الخارجي (Ta) 5 °C

درجة حرارة الوسط الداخلي (Tin) 18 °C

الحمل الحراري عند الجهة الساخنة (Qh) 110 W

المقاومة الحرارية لماص الحرارة الخارجي (Rh) 0.123681 K / W

النتائج

احسب

درجة حرارة الجهة الساخنة (Th) 32.697 °C

المقاومة الحرارية للديود الحراري (Rhp) 0.096784 m² °C / W

الحمل الحراري عند الجهة الباردة (Qc) 4.5359 W

معامل سيبك للمادة الكهروحرارية (a) 0.00020928 V / K

المقاومة النوعية للمادة الكهروحرارية (p) 1.0602e-005 Ohm.m

الإيصالية الحرارية للمادة الكهروحرارية (k) 1.6763 W / m.K

التيار الكهربائي المطبق (I) 2.4041 A

عامل الأداء للنظام (cop) 1.0588

رسم الخط البياني -1-

رسم الخط البياني -2-

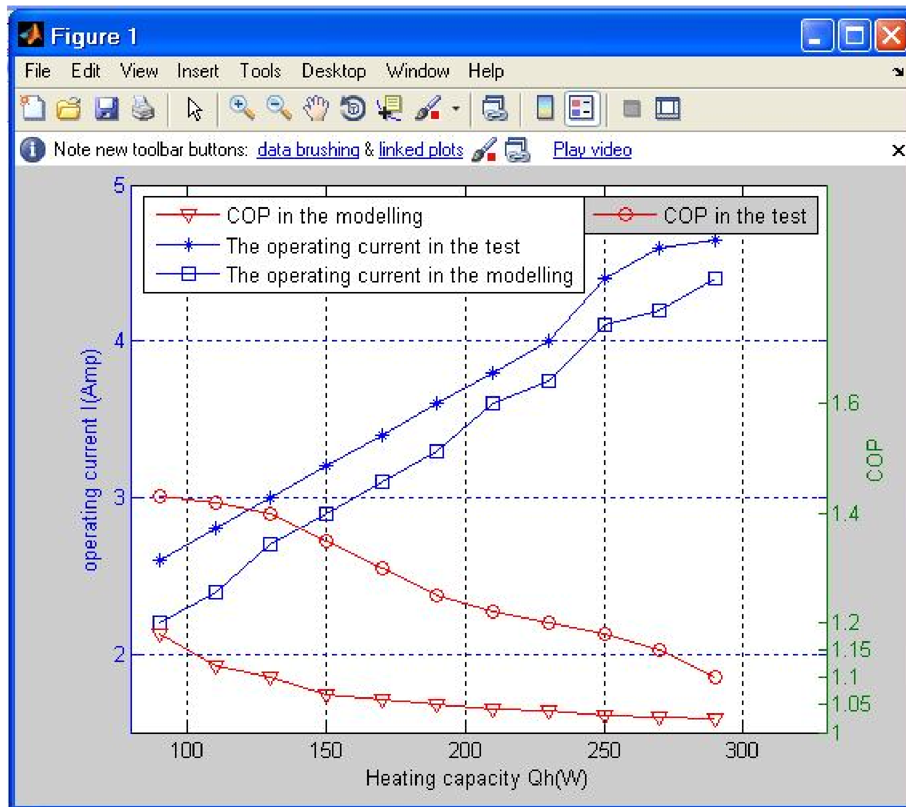
الشكل (6- 8) يبين واجهة البرنامج المصمم في حالة محاكاة التسخين.

الجدول (6- 4) يبين النتائج التجريبية وبجانبها قيم النمذجة حالة التسخين – حالة أولى.

قيم معامل الأداء	قيم التيار الكهربائي	قيم ثابتة خلال التجربة	مسلسل

	(T_{in} =18 ^{0}C ،T_a = 5 ^{0}C)	المطبق { A، (I) }		للنظام (COP)	
	قيم الحمل الحراري (Q_h , W)	النمذجة	التجربة	النمذجة	التجربة
1	90	2.21	2.4	1.18	1.5
2	110	2.41	2.7	1.14	1.43
3	130	2.7	3.1	1.1	1.40
4	150	2.9	3.2	1.07	1.35
5	170	3.1	3.4	1.06	1.30
6	190	3.4	3.6	1.05	1.25
7	210	3.6	3.8	1.043	1.22
8	230	3.8	3.9	1.04	1.20
9	250	4	4.2	1.03	1.18
10	270	4.3	4.5	1.028	1.15

الشكل (6- 9) يُظهر التمثيل البياني للنتائج الحاصلة، أي العلاقة بين سعة التسخين مع التيار المطبق ومعامل الأداء عند ثبات درجتي حرارة الوسط الخارجي والوسط الداخلي وتغير Q_h.



الشكل (6- 9) يبين مقارنة بين القيم النظريّة (النمذجة) والتجريبية لمعامل الأداء والتيار الكهربائي المطبق عند سعات تسخينية مختلفة في حالة التسخين.

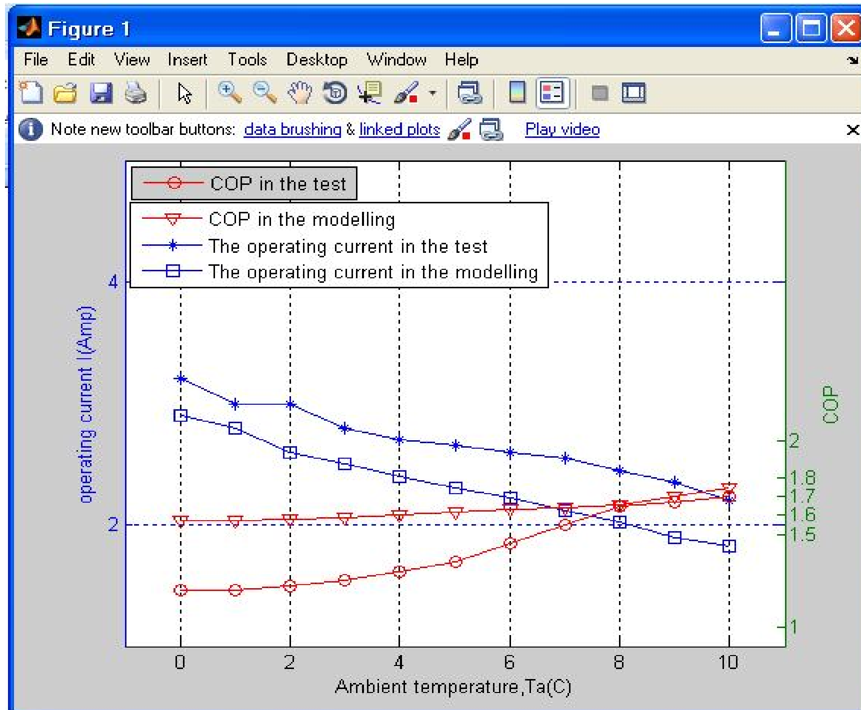
في **<u>الحالة الثانية</u>** المدروسة عند محاكاة التسخين هي دراسة التغيرات الحاصلة عند ثبات قيمة الحمل الحراري المزال Q_h ودرجة الحرارة الداخلية T_{in} مع تغير درجة حرارة

الوسط الخارجي T_a، بواسطة البرنامج المصمم لعملية النمذجة وتم تنظيم جدول للنتائج التي تم الحصول عليها من خلال النمذجة والتجربة الجدول (6- 5).

الجدول (6- 5) يبين قيم النمذجة والقيم التجريبية في حالة التسخين – حالة ثانية.

مسلسل	قيم ثابتة في التجربة (T_{in} =18 ^{0}C ،Q_h=100 W)	قيم التيار الكهربائي المطبق { A، (I) }		قيم معامل الأداء للنظام (COP)	
	قيم درجة حرارة الوسط الخارجي(T_a ,°C)	النمذجة	التجربة	النمذجة	التجربة
1	0	2.8	3.2	1.07	1
2	1	2.75	3.3	1.075	1.1
3	2	2.6	2.9	1.082	1.2
4	3	2.5	2.7	1.09	1.25
5	4	2.4	2.65	1.1	1.3
6	5	2.3	2.60	1.12	1.35
7	6	2.22	2.55	1.13	1.45
8	7	2.12	2.45	1.135	1.55
9	8	2	2.35	1.14	1.65
10	9	1.9	2.25	1.16	2

يبين الشكل (6- 10) التمثيل البياني للنتائج الموجودة في الجدول السابق



الشكل (6- 10) يبين مقارنة بين القيم النظريّة (النمذجة) والتجريبية لمعامل الأداء والتيار الكهربائي المطبق عند تغير درجة حرارة الوسط الخارجي في حالة التسخين.

6- 8 - مقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج التجريبية:

نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها عند سعات تبريديّة أو تسخينية مختلفة، وكذلك عند درجات حرارة خارجية مختلفة وتم مقارنتها مع النتائج التجريبية (اعتمدت النتائج التجريبية أثناء الدراسة على المرجع [12]) عند نفس شروط العمل لتحقيق المقارنة الصحيحة. وهذه المقارنات تظهر في المخططات البيانيّة التي من خلالها نرى أنّ نتائج النمذجة والنتائج التجريبيّة فيما يتعلق بقيم COP والتيار الكهربائي I تأخذ نفس اتجاه الميلان وذلك عند شروط عمل متشابهة، مع وجود فروقات في القيم، فقيم COP في النمذجة (النظريّة) هي دائماً أكبر من قيم COP التجريبيّة، بينما قيم التيار الكهربائي في النمذجة (النظري) هي دائماً أقل من القيم التجريبيّة للتيار الكهربائي المار، ويعود ذلك لعدد من العوامل تسهم في حدوث هذه الفوارق منها:

1- بسبب صعوبة حساب المقاومة الحراريّة للنموذج الجديد للديود الحراري ذي البنية المعقّدة، والتي تم تبسيطها باستخدام المعادلات التي تستخدم في الأنابيب الحراريّة التقليديّة، بينما النموذج الجديد (الديود الحراري) عولج كمثل 11 ديود حراري، كل واحد منها بقطر 10 mm، وبالتالي قيمة المقاومة الحراريّة التجريبية أكبر من قيمة المقاومة الحراريّة المحسوبة نظرياً.

2- المقاومات الحراريّة للنوابذ الحراريّة المستخدمة في المحاكاة صممت نظرياً كمقاومات حراريّة، بينما المقاومات الحراريّة الفعلية أكبر من المقاومات المصممة للاستخدام في النمذجة والتي تتضمن عيوب التأسيس للمقاومة المتلامسة بسبب التوضّع.

3- المحاكاة تفترض قيم نظريّة لمتغيرات العمل للوحدات الكهروحراريّة أثناء العمل، بينما الوحدات الكهروحراريّة المستخدمة في الاختبار التجريبي لها عادة تسامحات استخدام (صنعية).

4- حدود ضبط النموذج وأخطاء الاجراءات والنمذجة.

- الأخطاء المتعلقة بـ (1 و 2) هي عوامل رئيسيّة، تسبب فروقات بين نتائج المحاكاة ونتائج التجربة، فقيم المقاومات الحراريّة للديود الحراري والنوابذ الحراريّة المحسوبة أثناء النمذجة هي أصغر من قيمها التجريبيّة، وهذا يؤثر على درجات الحرارة للجهتين الباردة والساخنة، هي أصغر من قيمها في الاختبار التجريبي وهذا سيؤدي إلى أن معامل الأداء المحسوب في النمذجة COP سيكون أكبر من قيمته المحسوبة من نتائج التجربة وبينما التيار الكهربائي المار المحسوب في النمذجة سيكون أقل من قيمته في الاختبار، وهذا يوضح من خلال المعادلات.

- الأخطاء المتعلقة بــ (3 و 4) تسبب أخطاء ذات تأثير محدود تسهم في فروقــات ثانوية بين النتائج التجريبيّة ونتائج النمذجة.

أنّ COP يتأثر بشكل مباشر بدرجات الحرارة للجهتين الباردة والساخنة، اســتخدام هذه العوامل يتضمن بعض الأخطاء من استخدام المقاومة الحرارية.

تسهم عوامل التصحيح التي تضرب بالقيم التي تــم الحــصول عليهــا بالنمذجــة بأعطاء دقة أكبر لهذه القيم، للحصول على قيم دقيقة لمعامــل الأداء والتيــار الكهربــائي المطبق من خلال معادلاتهما السابقة.

الفصل السّابع

النتائج والتوصيات

The Results and Recommendations

7- 1- نتائج الدراسة التحليليّة النظريّة:

1- تم تحديد العمل المثالي باستخدام طريقة الحلول الحديّة للتوابع (Method of Solving for The Extremes of Function) عند دراسة المبرّدات الكهروحراريّة الثنائيّة بتصميميها الطراز الهرمي والمتوازي المستطيلات. النتائج أظهرت إنّ القيمة المثالية المحددة لــ X نسبة عدد الأزواج الكهروحراريّة بين الطبقتين في التصميم الهرمي، و لــ **t** نسبة التيار الكهربائي المار في الطبقتين في التصميم الثاني هي بحدود (**2.5 ÷3.5**)، إذا المواد الكهروحراريّة التجاريّة المستخدمة عُولجت بكثافة، وكما وجد أنّ أداء التبريد المثالي للمبرّدات الكهروحراريّة الثنائيّة الطبقات بتصميميها هو نفسه تقريباً، بالإضافة لملاحظة أنّ الفارق الحراري الأعظمي (حوالي 180 K) المحدّد للمبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات الهرمي يكون أكبر بكثير من الفارق الحراري الذي يحدثه المبرّد الكهروحراري الأحادي الطبقة (حوالي 80 K).

2 - عند إجراء المقارنة بين نظامي التبريد الكهروحراري الأحادي والثنائي، أظهرت النتائج أنّه عندما تكون نسبة درجة حرارة الجهة الساخنة T_h إلى درجة حرارة الجهة الباردة T_c (قيمة النسبة $\theta = T_h / T_c$) ذات قيمة صغيرة، يكون COP_{max} لنظام المبرّد الكهروحراري الثنائي الطبقات ذو قيمة أعلى من قيمته للنظام الأحادي، لكن معدّل التبريد الأعظمي من جهة ثانية أصغر من نظام المبرّد الكهروحراري الأحادي الطبقة. هنا الأكثر ملائمة للاستخدام في هذه الحالة هو نظام التبريد الكهروحراري الأحادي الطبقة.

3- الدراسة أظهرت أيضاً عندما تكون نسبة درجة حرارة الجهة الساخنة إلى درجة حرارة الجهة الباردة ذات قيمة كبيرة، يكون كل من COP_{max} ومعدّل التبريد الأعظمي لنظام التبريد الكهروحراري الثنائي الطبقة أكبر من قيمتهما عند نظام التبريد الكهروحراري الأحادي، وفي هذه الحالة النظام الثنائي هو الأفضل في الاستخدام، وبالإضافة إلى أنّ العلاقة بين COP ومعدّل التبريد للنظام الثنائي نُوقشت وتم استنتاج المجال المثالي لبعض العوامل المهمّة مثل COP، معدّل التبريد الأعظمي اللابعدي r، ومعامل البناء الداخلي X وتحديدها بالعلاقات اللازمة.إنّ النتائج الحاصلة هنا يمكن أن تفيد وتقدم بعض المعلومات المفيدة من أجل الحصول على أفضل تصميم وعمل لنظام مبرّد كهروحراري ثنائي الطبقات.

7- 2- نتائج دراسة محاكاة أداء النظام الهجين الحاسوبيّة:

- إنّ النتائج التجريبيّة والنتائج التي تم الحصول عليها بالنمذجة عند محاكاة أداء النظام المدروس، كان لهما نفس اتجاه الميلان عند رسم المنحني الخاص بقيم كل حالة مع بعض الفروقات، مما يعطي صحة ودقة لنتائج عملية المحاكاة الرياضيّة الحاسوبيّة للنظام الجديد.
- إنّ الاختلاف بين النتائج بالحالتين يعود **لسببين أساسيين:**
- طريقة حساب المقاومة الحراريّة للديود الحراري المستخدم والتي تم تبسيطها في عملية النمذجة، بينما هي واقعياً صعبة الحساب بسبب التعقيد في تركيب الديود الحراري ضمن النموذج التجريبي.
- الاختلاف بين النوابذ الحراريّة الفعلية والتصميم النظري لها في عملية النمذجة، وهذا يسبب اختلاف النتائج المحسوبة نظرياً في النمذجة عن القيم التجريبية.
- الأسباب السابقة مجتمعة تسبب فروقاً واضحة أثناء حساب درجتي الحرارة للجهتين الباردة والساخنة، وبالتالي للمتغيرات المتعلقة بهما كمعامل الأداء والتيار الكهربائي المطبق في النظام الجديد، وهذا يظهر في الأشكال البيانية ذوات الأرقام (6- 6) و(6 -7) و(6- 9) و(6- 10) .....
- عوامل التصحيح تسهم في تقليل الفوارق بين النتائج الحاصلة مما يعطي دقة وصحة أكبر لعملية ولنتائج النمذجة.

7- 3- التوصيات:

بالنسبة للتوصيات فإنّنا نوصي بالتالي:

1) - إجراء أبحاث مستقبلية تهتم بتحسين أداء النظام الجديد عن طريقة إيجاد آلية مطوّرة مع تقنية الديود الحراري (كاستخدام مواد متغيرة الطور)، لزيادة فعاليّة انتقال الحرارة للنظام.
2) - إجراء أبحاث أخرى حول تقنية التبريد الكهروحراري، كونها إحدى البدائل النظيفة و الأقل ضرراً بالبيئة.

الملحق -1-

1- نماذج من الوحدات الكهروحراريّة:

النموذج: AC - 027، الثمن (ليرة سورية 10293 ≈ 219 $).



الشكل (1 -1) يبين الوحدة الكهروحراريّة من النوع AC- 027.

▪السعة التبريديّة: W 27 عند فارق حراري $0\ ^{0}C$ درجة مئوية.

▪أهم الاستخدامات: تبريد الأجهزة الإلكترونية الصغيرة المغلقة، المبرّدات الصغيرة.

▪التوصيف: هو المبرّد الهوائي الأصغر، تغذيته 12 VDC، صنفه NEMA 12 ويمكن أن يعدّل وفق المتطلبات المرغوبة ليناسب الصنف 4 NEMA، استهلاك طاقي منخفض مما يجعله منافساً للمبرّدات الهوائية الأخرى.



النم

وذج: AC - 046، الثمن (ليرة سورية 14053 ≈ 299 $).



الشكل (1- 2) يبين الوحدة الكهروحراريّة من النوع AC- 046.

▪السعة التبريديّة: W 46 عند فارق حراري مساوٍ للصفر.

▪أهم الاستخدامات: تبريد الأجهزة الإلكترونيّة الصغيرة والمتوسطة القيـــاس، المبـــرّدات المحمولة، تطبيقات علم الأحياء.

▪التوصيف: هذا المبرّد ذو تغذية 24 VDC ولـــه تــصنيف NEMA 12, NEMA 4 ويستخدم أيضاً وحدتين كهروحراريتين ومزود بنوابذ حراريّة ذات كثافة عالية ليجعلـــه ذا أداء مثالي وتكلفة منخفضة، الاستهلاك الطاقي المنخفض يجعله ينافس غيره من النماذج.

☒ **النموذج: AC - 073، الثمن (ليرة سورية 23453 ≈ $ 499).**



الشكل (1 - 3) يبين النموذج AC- 073.

▪السعة التبريديّة: 73 W عند فارق حراري مساوٍ للصفر.

▪أهم الاستخدامات: تبريد الأجهزة الإلكترونيّة المغلقة متوسطة القياس – تجهيـــزات علـــم طب الأحياء (Biomedical).

▪التوصيف: المبرّد ذو تغذية 24 VDC، وتصنيف NEMA 12 ، ويمكن أن يناســـب 4 NEMA، يستخدم وحدتين كهروحراريتين مع ماص (نابذ) حراري يحوي زعـــانف بكثافة عالية تجعله يعمل بأداء عالٍ وخاصة في أجهزة إصدار الإشارات الإذاعية.

☒ **النموذج : AC - 162، الثمن (ليرة سورية 31866 ≈ $ 678).**



الشكل (1- 4) يبين النموذج AC-162.

▪السعة التبريديّة: W 162 عند فارق حراري مساوٍ للصفر.

▪أهم الاستخدامات: في المبرّدات والأجهزة المستخدمة في علم الأحياء عندما يُطلب تبريداً بدرجة حرارة قريبة من درجة حرارة التجمد، تبريد الإلكترونيات المغلقة.

▪التوصيف: يحوي هذا النموذج ستة وحدات كهروحراريّة، مواد رابطة، نوابــذ حراريّــة مزعنفة على الجهتين الباردة والساخنة، وهذا الأمر يجعله ذا فعاليّة عالية، النابذ الحراري المزعنف على الجهة الباردة يحافظ على فرق حراري بين الهواء الداخلي والجهة البــاردة أقل ما يمكن، يمكن القول مفيد خاصة للتبريد عند درجات حرارة قريبــة مــن الــصفر، (NEMA 12 , NEMA 4 ،24 VDC).

☒ **النموذج: AC - 194 ، الثمن (ليرة سورية 38117 ≈ 811 $).**



الشكل (1- 5) يبين النموذج AC- 194.

▪السعة التبريديّة: W 194 عند فارق حراري مساوٍ $0\ ^0C$.

▪أهم الاستخدامات: مناسب لتبريد أجهزة الاتصالات اللاســلكية ، حجــر البطاريــات و المبرّدات. هذا المبرّد ذو تغذية VDC 48، وهو من فئة NEMA 4، فيه مروحة الجهة الساخنة مضادة للرطوبة والنوابذ الحرارية مقاومة للصدأ.

2- بعض المنتجات التي تستخدم نظام تبريد كهروحراري:





(a) (b)

الشكل (2-1-a) يظهر مبرّد كهروحراري يحافظ على $T_c = (2 \div 8)\ ^0C$ لمدة 4 أيام للاستخدامات الطبية، بينما الشكل (b) يظهر مبرداً كهروحرارياً مخبرياً.



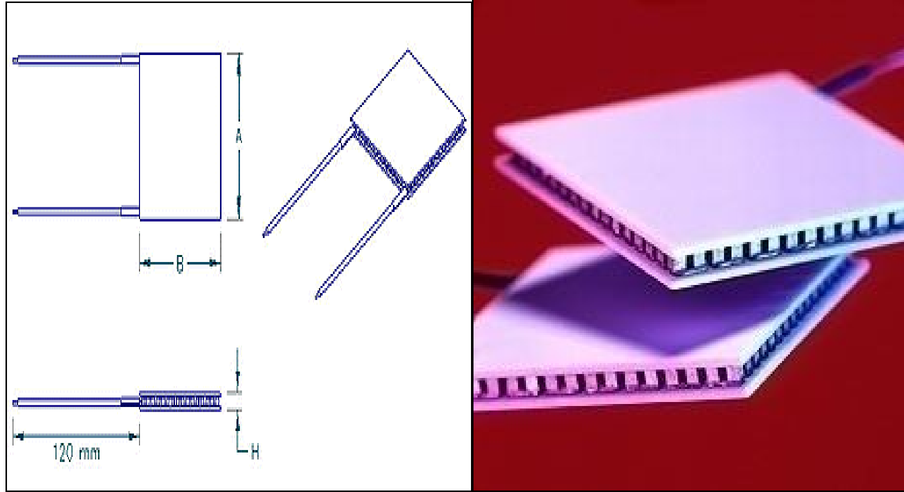


الشكل (2 -2) يظهر مبرّد كهروحراري خاص للرحلات لحفظ الأطعمة و المشروبات . الشكل (2- 3) يبين تطبيق طبي للكهروحراريّة (Heat-transfer control of thermoelectric actuator and its medical application) صمم في جامعة طوكيو (Heat transfer control lab, Tohoku University, Japan)

3- أنواع الوحدات الكهروحراريّة:

3-1- الوحدات الكهروحراريّة ذات درجة الحرارة العالية:

هي مخصصة للعمل حتى $200\ ^0C$ بينما غيرها مصمم على أســاس تحمــل حتــى $80\ ^0C$، نرى جانباً صوراً توضيحية لهذه النماذج وفي الأسفل جدول يبين أهم الأنواع.

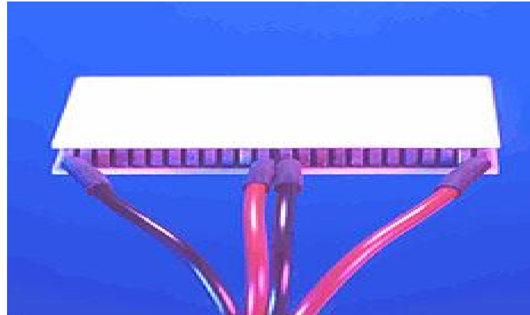


الشكل (3- 1) يبين صوراً لوحدات كهروحراريّة عالية التحمل للحرارة.

الجدول (3 -1) يبين مواصفات الوحدات الكهروحراريّة العالية التحمل.

Product	I_{max} (A)	Q_{max} (W)	V_{max} (V)	ΔT_{max} (^0C)	A (mm)	B (mm)	H (mm)
VT-127-1-1.3-71	3.6	36	16.1	71	30	30	3.6
VT-127-1.4-1.15-71	8	80	16.1	71	40	40	3.4
VT-127-1.4-1.5-72	6.1	62	16.3	72	40	40	3.9
VT-199-1.4 - 0.8	11.3	172	24.6	67	40	40	3.2
V T-199-1.4-1.15	7.9	120	24.6	69	40	40	3.4
V T-199-1.4-1. 5	6.1	94	24.9	70	40	40	3.9

3- 2- ربط الوحدات الكهروحراريّة على التسلسل – على التفرع:



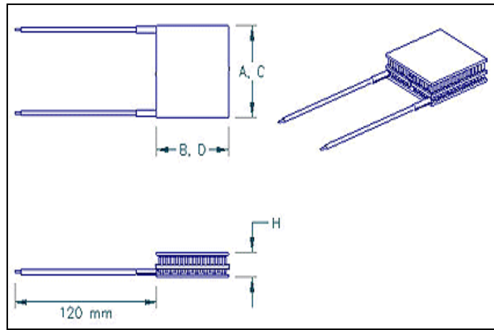
الشكل (3- 2) يبين كيفية الربط بين الوحدات الكهروحراريّة على التسلسل.

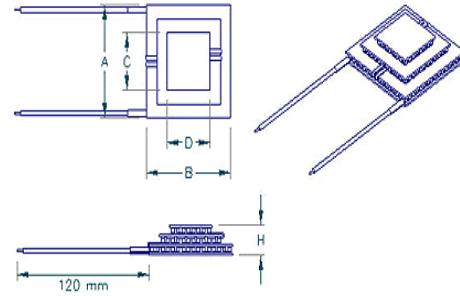
الجدول (3 - 2) يبين مواصفات الوحدات الكهروحراريّة حسب نوع الربط بينهما.

Product	T_{max} (A)	Q_{max} (W)	V_{max} (V)	ΔT_{max} (^0C)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	H (mm)
SP-262-1.0-2.5	Ser 1.9 Par 3.7	36.3	Ser 31.8 par 15.9	72	40	40	40	40	4.8
SP-262-1.0-1.5	Ser 3.1 Par 6.2	61	Ser 31.4 Par 15.4	70	40	40	40	40	4.8
SP-262-1.0-1.3	Ser 3.6 Par 7.2	70	Ser 31.4 Par 15.7	69	40	40	40	40	4.6

3 -3− الوحدات الكهروحراريّة متعددة الطبقات:







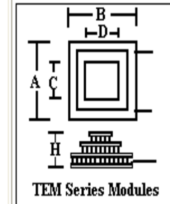
■ نظام متعدد الطبقات ذو التصميم الهرمي. نظام ثنائي الطبقات ذو التصميم متوازي المستطيلات.

الشكل (3 -3) يبين تصاميم للأنظمة الكهروحراريّة متعددة الطبقات.

الجدول (3 -3) يبين مواصفات الوحدات الكهروحراريّة متعددة الطبقات.

TEM Series (Multi-stage)Thermoelectric Module

وحدات كهروحرارية متعددة الطبقات



رمز الوحدة الكهروحرارية	هذه المعلومات عند درجة حرارة للجهة الساخنة Th=27°C.				Dimension in mm		
	Imax(amps)	DTmax(°c)	Vmax(volts)	Qmax(watts)	AxB	CxD	H
TEC2-31-17-04	4.0	88	3.8	6.0	20x20	15x15	7.4
TEC2-71-31-04	4.2	88	8.6	12.6	30x30	20x20	7.4
TEC2-127-63-06	6.5	88	15.0	35.60	40x40	40x40	7.5
TEC3-71-31-17-03	3.6	98	7.8	6.6	30x30	15x15	10.6
TEC3-127-71-31-03	3.5	97	15.0	12.5	40x40	20x20	10.6
TEC4-127-71-31-17-03	3.0	112	15.00	3.4	40x40	15x15	13.9

الجدول (3- 4) يبين نماذج الوحدات الكهروحراريّة حسب الشركات المنتجة لها.

النموذج	بارامترات الاداء				الابعاد الرئيسية					#	الشركة المنتجة
	ΔT (°C)	Q_{max} (W)	I_{max} (A)	V_{max} (V)	Base Width (mm)	Base Length (mm)	Top Width (mm)	Top Length (mm)	Height (mm)		
DT12-2.5	74	23	2.5	14.7	30.0	34.0	30.0	30.0	4.0	1	Marlow
DT12-6	74	54	5.6	14.7	40.0	44.7	40.0	40.0	4.0	1	Marlow
DT3-2.5	73	6	2.5	3.6	16.0	20.5	16.0	16.0	4.0	1	Marlow
DT6-4	73	20	3.7	8.2	23.5	28.0	23.5	23.5	3.4	1	Marlow
MI1010T	67	0.47	1	0.8	3.9	3.9	3.9	3.9	2.4	1	Marlow
MI1022T	69	4	1.8	3.5	8.7	8.8	8.7	8.7	2.1	1	Marlow
NL1010T	67	0.47	1	0.8	3.9	3.9	3.9	3.9	2.4	1	Marlow
RC12-4	74	36	3.7	14.7	30.0	34.0	30.0	30.0	3.4	1	Marlow
SP1507	64	5.4	1.8	4.7	14.3	11.2	11.2	11.2	2.0	1	Marlow
HWD0500-4040	***58***	***513***	***60***	***15.2***	***44***	***40***	***40***	***40***	***1.2***	***1***	***Marlow***
CP 1.4-7-10L	68	1.8	3.9	0.85	9.4	9.4	9.4	9.4	4.7	1	Melcor
CP 1.0-71-06L	67	14.4	3.0	8.6	23	23	23	23	3.6	1	Melcor
CP 2-31-	67	29.3	14.	3.8	30	30	30	30	4.6	1	Melcor

CP 2-127-06L	67	120	14.0	15.4	62	62	62	62	4.6	1	Melcor
930-7	66	1.8	3.7	0.8	9.6	9.6	9.6	9.6	4.7	1	TECA
940-7	66	6.8	14.0	0.8	14.6	14.6	14.6	14.6	4.6	1	TECA
950-7	66	3.0	6.0	0.8	9.6	9.6	9.6	9.6	3.8	1	TECA
960-127	66	26.0	3.0	15.4	30.0	30.0	30.0	30.0	3.6	1	TECA
TE-7-1.0-2.5	72	1	1.9	0.9	8	8	8	8	4.8	1	TEtech
TE-8-0.45-1.3	69	0.4	0.7	1	5	3.4	3.4	3.4	2.3	1	TEtech
TE-32-2.8-1.5	70	60	24.4	4	40	40	40	40	4	1	TEtech
TE-83-1.0-1.3	69	22.5	3.6	10.3	22	19	22	19	3.6	1	TEtech
MI2011T	87	0.47	0.7	1.9	0.26	0.26	0.15	0.15	0.16	2	Marlow
2 CP 085 100-31-20	77	9.74	5.9	3.8	23	26	30	30	10.7	2	Melcor
TE-2-(11-4)-1.5	93	0.4	1	1.3	6	4	2	4	< 6.7	2	TEtech
MI3021T	109	0.33	1.3	1.9	0.26	0.26	0.1	0.1	0.212	3	Marlow
3 CP 040 065-127-71-31	96	6.48	1.8	15.4	15	15	30	30	9.5	3	Melcor
TE-3-(31-11-4)-1.5	109	0.4	0.9	3.5	10	8	2	4	< 9.3	3	TEtech

الملحق-2-

بطاقة تعريف بوسيط التبريد المستخدم (n- pentane):

2- 1- بطاقة التعريف الكيميائيّة (Chemical Identification):

CHEMINFO Record Number	رقم التسجيل	98
CCOHS Chemical Name (Canadian Centre for Occupational Health and Safety)	الاسم الكيميائي بـــ	n-Pentane
Synonyms	المرادفات	Amyl hydride Normal pentane Pentane (non-specific name)
Chemical Name French		Pentane normal
CAS Registry Number		109-66-0
UN/NA Number(s):		1265
RTECS Number(s): Registry of Toxic Effects of Chemical Substances		RZ9450000
EU EINECS/ELINCS Number		203-692-4
التصنيف الكيميائي Chemical Family:	Saturated aliphatic hydrocarbon / paraffin / alkane / pentane isomer	
Molecular Formula	الصيغة المختصرة	C_5-H_{12}
Structural Formula	الصيغة المفصلة	CH_3-$(CH_2)_3$-CH_3

2 -2 - الخصائص الكميائيّة والفيزيائيّة لوسيط التبريد **(n-pentane):**

Molecular Weight	الوزن المولي	72.15 g / mol
(Conversion Factor): عوامل التحويل ، ppm (part per million) 1 ppm = 2.94 mg/m^3; 1 mg/m^3 = 0.34 ppm at 25 ^{0}C (calculated)		
Physical state	الحالة الفيزيائية	سائل/ لا لون له
Melting Point	نقطة الذوبان	-130 ^{0}C (-202 deg F)
Boiling Point	نقطة التبخر	36 ^{0}C (97 deg F)
Relative Density (Specific Gravity):	الكثافة النسبية	0.626 g/cm^3 at 20 ^{0}C (water = 1)
Solubility in Water	قابلية الانحلال بالماء	عملياً غيرقابل للانحلال (38 mg/L at 25 ^{0}C)
Solubility in Other Liquids:	قابلية الانحلال في السوائل الأخرى	(acetone و

		قابل للمزج Ethanol)(مع (وذوانحلالية متغيرة في المذيبات العضوية اللاقطبية chloroform وToluene) (methylene chloride) وانحلالية ضعيفة أو عديم الانحلالية في المذيبات القطبية(methanol) كالـ
Coefficient of oil/Water Distribution (Partition Coefficient)	معامل التقسيم	Log P(oct) = 3.39
pH Value	قيمة الـ PH	-
Viscosity-Dynamic	اللزوجة الديناميكية	+0.23mPa.s (0.23 centipoises) at 20 ^{0}C +0.22 mPa.s (0.22 centipoises) at 25 ^{0} C
Viscosity-Kinematic	اللزوجة الستاتكية	0.37 mm2/s (0.37 centistokes) at 20 ^{0}C (calculated)
Saybolt Universal Viscosity	اللزوجة بمقياس سيبولت يونفرسال	26.8 Saybolt Universal Seconds at 37.8 ^{0}C (100 deg F) (calculated)
Surface Tension	التوتر السطحي	+16 mN/m (16 dynes/cm) at 20 ^{0}C +15.45 mN/m (15.45 dynes/cm) at 25 ^{0}C (calculated)
Vapour Density	كثافة البخار	2.48 (air = 1) (calculated)
Vapour Pressure	ضغط البخار	+65.1 kPa (488 mm Hg) at 20 ^{0} C +68.5 kPa (514 mm Hg) at 25 ^{0} C
Vapour Pressure at 50 ^{0} C	ضغط البخار عند 50 ^{0}C	164 kPa (1229 mm Hg) (calculated)
Saturation Vapour Concentration	تركيز البخار المشبع	642000 ppm (64.2%) at 20 ^{0}C; 676000 ppm (67.6%) at 25 ^{0}C

		(calculated)
Evaporation Rate	معدّل التبخر	12.4 -13 (butyl acetate = 1)

الرموز و المصطلحات المستخدمة

الرمز	واحدة القياس	المصطلح الإنكليزي	المصطلح العربي
ε = COP	----	Coefficient of performance	معامل الأداء
$_{m}\varepsilon$	________	Coefficient of performance at maximum rate of cooling	معامل الأداء عند معدّل تبريد أعظمي
COP_{max}	______	Maximum coefficient of Performance	القيمة الأعظميّة لمعامل الأداء
r	_______	Dimensionless rate of cooling of pair semiconductor	معدّل التبريد اللابعدي للزوج من أنصاف النواقل
r_{m}	_______	Dimensionless rate of cooling at cop $_{max}$	معدّل التبريد اللابعدي عند معامل أداء أعظمي
r_{max}	________	Maximum dimensionless rate of cooling of pair semiconductor	القيمة الأعظميّة لمعدّل التبريد اللابعدي لزوج أنصاف النواقل
c_p	J / kg. K	Specific heat at constant pressure	الحرارة النوعيّة عند ضغط ثابت
k	W/ m.K	Thermal conductivity of thermoelectric material	الإيصاليّة الحراريّة للمادة الكهروحراريّة
k	W /K	Thermal conductance of pair TE	الناقليّة الحراريّة للزوج الكهروحراري
I	A	Electric current	التيار الكهربائي المار
j	-------	Dimensionless electric current	التيار الكهربائي اللابعدي
j_{max}	——	Maximum value of dimensionless electric current	القيمة الأعظميّة للتيار اللابعدي
j_{min}	-----------	Minimum value of dimensional electric current	القيمة الصغرى للتيار اللابعدي
A	m^2	Cross-section area of thermoelememts	مساحة مقطع العناصر الحراريّة

L	m	Length of thermoelement	طول العنصر الحراري
G	m	Structural parameter of thermoelement	معامل البناء للعنصر الحراري
q_i ($i = c_1,c_2,h_1,h_2$)		Dimensionless thermal flow	التدفق الحراري اللابعدي
Q_c	W	Cooling capacity of TE cooler	سعة التبريد للمبرّد الكهروحراري
Q_h	W	Heat rejection of TE Cooler	الحرارة المنبوذة من المبرّد الكهروحراري
Q_m	W	Heat flow between two stages	التدفق الحراري بين طبقتي المبرّد
P	W	Total input power of TE cooler	الطاقة الداخلة الكلية(المستهلكة) للمبرّد
P	______	Dimensionless power input	الطاقة الداخلة اللابعدية
N_0	_____	Total number of semiconductor pairs	العدد الكلي للأزواج نصف الناقلة
m	_____	Number of semiconductor pairs in the second stage	عدد الأزواج نصف الناقلة في الطبقة الثانية
n	________	Number of semiconductor pairs in the first stage	عدد الأزواج نصف الناقلة في الطبقة الأولى
T_c	K	Cold side temperature of cooler	درجة حرارة الجهة الباردة للمبرّد
T_h	K	Hot side temperature	درجة حرارة الجهة الساخنة للمبرّد
T_m	K	Medium temperature	درجة الحرارة المتوسطة
T_{in}	K	Inner temperature	درجة الحرارة الداخلية (الحيز المبرّد)
$\Theta = T_h / T_c$	______	Dimensionless rate of temperature	النسبة اللابعدية لدرجات الحرارة
Z	K^{-1}	Figure of merit	مميزة الشكل (رقم الاستحقاق)
R	Ω	Electric resistance	المقاومة الكهربائية للعنصر الحراري
R_c	K /W	Inside heat sink thermal resistance	المقاومة الحرارية للمبادل الحراري الداخلي
R_h	K / W	Outside heat sink thermal resistance	المقاومة الحراريّة للمبادل الحراري الخارجي
R_{hp}	m^2.K /W	Thermal resistance of thermal diode	المقاومة الحراريّة للديود الحراري
$X= m/n$	-------	Ratio of number of TE pair between stages	نسبة عدد الأزواج في الطبقة الأولى إلى الثانية
t	------------	Ratio of electric current between stages	نسبة التيار الكهربائي المار بين الطبقتين
π_{PN}	V	Peltier coefficient at the junction of Materials P and N	معامل بيلتيه للوصلة
α	V/ K	Seebeck coefficient	معامل سيبك
E_{PN}	V	Seebeck- Electromotive force	القوة المحركة الكهربائيّة– قوة سيبك

ρ	Ω. m	Electric resistivity	المقاومة الكهربائيّة النوعيّة
τ	V/ K	Thomson coefficient	معامل طومسون
V	m^3	Volume	الحجم
T_a	K	Ambient temperature	درجة حرارة الوسط الخارجي

References:

[1] AGWU A.G.; RUTHERFORD W.I.; WESSAM E.; SANKOWSKI. B.R, 2009 -**Assessment of Thermoelectric Module with Nanofluid Heat Exchanger**. *Applied Thermal Engineering*, **29**, p491-500.

[2] ASTRAIN D.; VIAN J.G.; ALBIZUA J.,2005-**Computational Model for Refrigerators Based on Peltier Effect Application.** *Applied Thermal Engineering*,**25,** p 3149-3162**.**

[3] CHENG Y.H.;SHIH C., 2006-**Maximizing the Cooling Capacity and COP of Two-Stage Thermoelectric Coolers Through Genetic Algorithm.***Applied Thermal Engineering*, **26** , P 937–947**.**

[4] FRANCIS R., 2006 - **Commercialization of Thermoelectric Technology**. GM Power train ,General Motors Corporation,p 04.1-04.9.

[5] GONCALVES L.; ROCHA J.G.; COUTO C.; ALPUIM P.; ROWE D.M., 2006 **- On Chip Thermoelectric Microcoolers.** *MicroMechanics Europe Workshop* **,** 3÷5 September 2006**,** Southampton, UK ,p53-56.

[6] GROMOV G., 2002 -**Thermoelectric Cooling System Modules**. RMT. Ltd, 53 Leninskij prosp, Moscow 119991 Russia, p1-9.

[7] HAGENS H.A.; GANZEVLES F.L.;GROOTEN M.H.,2007- **Air Heat Exchangers with Long Heat Pipes: Experiments and Predictions**. *Applied Thermal Engineering*,**27**,p2426-2434.

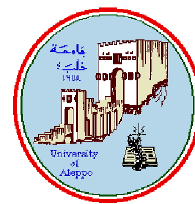
[8] HUANG B.J.; CHEN C.J.; DUANG C.L., 2000-**A Design Method For a Thermoelectric Cooler**. *Int J Refrigeration*, **23**, 208-218**.**

[9]Marlow Industries **, INC®.,** 1998 **-Thermoelectric Cooling Systems - Design Guide.** 10451 Vista Park Road, Dallas T X 75238-1645,USA.P1-23.
[10] NOLAS G.S.; SHARP J.; GOLDSMID H.J., 2001- **Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Development**. Berlin.
[11] PALACIOS R.; ARENAS A.; PECHARROMAN R.R.;PAGOLA F.L.,2009**-Analytical Procedure to Obtain Internal Parameters From Performance Curves of Commercial Thermoelectric Modules.** *Applied Thermal Engineering* ,**29**, p3501–3505.
[12] RIFFAT S.B.;WILSON R.,2006- **Performance Simulation and Experimental Testing of a Novel Thermoelectric Heat Pump System**. *Applied Thermal Engineering*,**26,**P494-501**.**
[13] STOCKHOLM J.G., 1995- **Modeling of Thermoelectric Cooling Systems, In: CRC Handbook of Thermoelectrics**. New York, CRC Press,p 677-683.
[14] WEBB R.L.; GILLEY M.D., 1998- **Advanced Heat Exchange Technology For Thermoelectric Cooling**. *Journal of Electric Packaging*, **120**, p98-105.
[15] WWW. WEBSITE.,2000 -**Thermoelectric Cooling** -The Basics ,P1-3.
[16] YAMASHITA O.; ODAHARA H.;OCHI T.,2007- **Dependence of Seebeck Coefficient on a Load Resistance and Energy Conversion Efficiency in a Thermoelectric Composite.** *Materials Research Bulletin* **,42**, P1785–1803**.**
[17] YANG B., 2007- **Thermoelectric Technology Assessment**. Department of Mechanical Engineering, University of Maryland at College Park, College Park, MD 20742, P 3.
[18] YANG B., 2007-**Thermoelectric Technology Assessment**. Department of Mechanical Engineering, University of Maryland at College Park, College Park, MD 20742, P128-132.

19- الكنج راتب محمد، 1999**- آلات التبريد**. مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية- جامعة حلب، 309 صفحة.

20– العموري عبد الله، **حمّاد** محمد، 2007 **- آلات التبريد**.مديرية الكتب والمطبوعات الجامعية- جامعة حلب، 602 صفحة.

Syrian Arab Republic
Ministry of High Education
University of Aleppo-Faculty of Mechanical Engineering
Department of Applied Mechanical



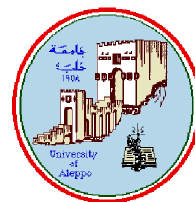
Comparison Between The Performance Characteristics of Single- and Two-Stage Thermoelectric Refrigeration Systems

A Dissertation Presented For the Master in Mechanical Engineering

Candidate
Eng. Yasser Abdalrazzak al- Ghanimeh

Academic Year 2009 / 2010

Syrian Arab Republic
Ministry of High Education
University of Aleppo-Faculty of Mechanical Engineering
Department of Applied Mechanical



Comparison Between The Performance Characteristics of Single- and Two-Stage Thermoelectric Refrigeration Systems

A Dissertation Presented For the Master in Mechanical Engineering

Supervise by
Dr. Abdullah al -Amouri
Department Power Engineering
Faculty of Mechanical Engineering - University of Aleppo

Candidate
Eng. Yasser Abdalrazzak al- Ghanimeh

Academic Year 2009 / 2010

Certification

I Certify that the work described in this thesis " **Comparison Between The Performance Characteristics of Single- and Two- Stage Thermoelectric Refrigeration Systems "** is result of a scientific research done by the candidate Eng. Yasser al- Ghanimeh under the supervision of Dr. Abdullah al- Amouri**.**

M.Candidate	Supervisor
Yasser al- Ghanimeh	Dr. Abdullah al-Amouri**.**

Declaration

I declare that this research "**Comparison Between The Performance Characteristics of Single- and Two- Stage Thermoelectric Refrigeration Systems** " has been accepted for getting an academic degree and it is not submitted for getting one recently.

M.Candidate

Yasser al- Ghanimeh

Abstract

The aim of this the research to study a type from the types new cooling that found in the later time an increase in the investigation due to the thermoelectric cooling has a lot of advantages necessity with the technical development.

First of all, a study the design configurations for thermoelectric cooling systems are used such as a single and two-stages with presents the properties each design, thus proceeding comparison study between two thermoelectric cooling systems is established based on non-equilibrium thermodynamics.

They are used to derive the general expressions of three important performance parameters, are the coefficient of performance, the rate of refrigeration, and the power input. By using these expressions, the performance of the two-stage thermoelectric refrigeration system is discussed in detail.

Here we calculated the maximum COP, rate of refrigeration and determined the internal structure parameter of the thermoelectric devices, the results obtained here are compared with those of a single-stage thermoelectric refrigeration system, when (θ) is small(temperature ratio of the heat sink to the cooled space), the COP_{max} of a two- stage thermoelectric refrigeration system is larger than that of single – stage thermoelectric refrigeration system but its maximum rate of refrigeration is smaller than that of a single- stage thermoelectric refrigeration system, here a single- stage is more convenient to use. But when (θ) is larger, both the COP_{max} and the maximum rate of refrigeration of a two- stage thermoelectric refrigeration system are larger than those of a single- stage thermoelectric refrigeration system. In such a case a two- stage thermoelectric refrigeration should be used.

Second, in the program department presents a computer model to simulate the performance a novel thermoelectric heat pump system, for developed an effective the performance thermoelectric system , namely Hybrid System is design based on the integration thermoelectric and vapour- compression cycle, the new system produced a good results in the performance. computer modeling showed that the heat transfer capacity are 940 W at cooling mode, Theoretical analysis for the system presage an improvement a capacity cooling and COP for new Hybrid System.